Дубаренко Владимир Васильевич
Доктор технических наук, профессор.
Место работы:
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
проблем машиноведения Российской
академии наук (ИПМаш РАН),
г. Санкт-Петербург.

Кучмин Андрей Юрьевич
Кандидат технических наук.
Место работы:
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
проблем машиноведения Российской
академии наук (ИПМаш РАН),
г. Санкт-Петербург.

Артеменко Юрий Николаевич
Кандидат технических наук.
Место работы:
Астрокосмический центр Физического
института им. П. Н. Лебедева Российской
академии наук (АКЦ ФИАН), г. Москва.

Шишлаков Владислав Федорович
Доктор технических наук, профессор.
Место работы:
Государственное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения (ГУАП).

В. В. Дубаренко — А. Ю. Кучмин — Ю. Н. Артеменко — В. Ф. Шишлаков

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

С РЕГУЛИРУЕМЫМИ
ПОВЕРХНОСТЯМИ
ЗЕРКАЛ

Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
(ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург
Астрокосмический центр
Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии
наук (АКЦ ФИАН), г. Москва
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
ЗЕРКАЛ
Монография

УДК 681.5
ББК 32.845
Р15

Рецензенты:
член-корреспондент РАН *Д. А. Индейцев*;
кандидат физико-математических наук, доцент *В. Г. Курбанов*

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве монографии

Протокол № 5 от 26 апреля 2019

**Авторы: В. В. Дубаренко, А. Ю. Кучмин, Ю. Н. Артеменко,
В. Ф. Шишлаков**

Р15 Радиотелескопы миллиметрового диапазона с регулируе-
мыми поверхностями зеркал: монография. – СПб.: ГУАП,
2019. – 239 с.
ISBN 978-5-8088-1378-6
DOI 10.17513/nr.368

Рассматриваются результаты работ по созданию интеллектуаль-
ных систем управления наземных радиотелескопов миллиметрового
диапазона с регулируемой поверхностью зеркальной системы, в том
числе высокоточных систем наведения на основе механизмов парал-
лельной структуры, средств поддержки принятия управленческих
решений, что соответствует направлению Плана фундаментальных
научных исследований Российской академии наук на 2013–2020
годы. Пункт 32. Интеллектуальные системы управления; управле-
ние знаниями и системами междисциплинарной природы, человек в
контуре управления.

Разделы 2.3.3, 3 и 4.5 написаны лично Кучминым А. Ю. и являют-
ся частью его докторской диссертации. Авторство по другим разделам
делится между членами авторского коллектива в равной пропорции.

Исследования проводились в соответствии с проектом создания
международной астрономической обсерватории «Суффа» (Узбеки-
стан) в сотрудничестве с совместной лабораторией интеллектуальных
систем управления между Федеральным государственным бюджет-
ным учреждением науки Институт проблем машиноведения Россий-
ской академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург и Федераль-
ным государственным автономным образовательным учреждением
высшего образования Санкт-Петербургский государственный уни-
верситет аэрокосмического приборостроения.

УДК 681.5
ББК 32.845

ISBN 978-5-8088-1378-6
DOI 10.17513/nr.368

© Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ 1

Предпосылки к выполнению работы

Радиотелескопы представляют собой уникальные измерительные приборы, выполненные на грани научных, технических и технологических возможностей, предназначенные для фундаментальных исследований объектов ближнего и дальнего космоса посредством радиосвязи. Они состоят из зеркал, радиоприемных устройств, механизмов и электроприводов наведения, металлических и железобетонных конструкций и различного вида устройств, обеспечивающих управление приводами.

Технические характеристики радиотелескопов (РТ), то есть их формы, подвески, размеры, точности выполнения профилей отражающих поверхностей зеркал, скорости, точности наведения, жесткости металлоконструкций и механизмов и другие данные, находятся в прямой зависимости от требований, предъявляемых к решению задач радиосвязи.

РТ являются сложными электромеханическими системами, объединяют в себе большинство характерных свойств динамических объектов, которые описываются нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка и служат хорошим «полигоном» для отработки на них общезначимых теоретических разработок в областях динамики машин и процессов их управления. Поэтому научные результаты, полученные при исследовании динамических свойств РТ, могут быть распространены на электромеханические объекты другого прикладного применения.

Изобретению уникальных приборов предшествовали этапы теоретических исследований, направленные на создание математических моделей систем наведения РТ как объектов управления и разработку самих методов управления. Был проведен ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, результаты которых подтверждены обширным документальным материалом, полученным при отработке действующих установок в реальных условиях их эксплуатации.

Среди многочисленных участников проектов и НИР, с которыми авторам приходилось непосредственно сотрудничать, стимулировавших исследования, оказавших большую помощь, повлиявших на получение конкретных результатов, самостоятельно внесших большой вклад в создание целого ряда радиотелескопов для систем дальней космической связи, ставших пионерами создания радиотелескопа РТ-70, выделим следующие имена:

От КБСМ:

Главные конструкторы РТ: Ухов А. И. (основоположник отечественного радиотелескопостроения), Коробов Б. С., Князев И. Н., Кучинский Г. С., Зайцев А. А., Армосов Е. А., Гиммельман В. Г.;

зам. главного конструктора: Горицкий И. И., Федосеев Л. М., Мозгов А. П., Лобанов Е. П., Рысков Б. П., Матвеев Е. Н.;

в области механики, динамики, прочности: Рождественский Д. В., Мыслевец В. Л.; Воробьев А. М.;

в области электропривода, процессов управления: Степанов Д. Г., Перепеч В. М., Сало В. Г., Панкратов Б. В., Юрьев В. С.;

в области имитационного моделирования: Бадю Е. И.;

в области микропрограммного управления: Назаров В. В., Тихомиров В. В.;

в области лабораторных, стендовых и натурных испытаний электроприводов: Ильин А. С., Чирков В. Б., Сазонов Б. Н., Ширяев В. Н.;

в области измерений и коррекции деформаций конструкций РТ: Харлампиев Д. В.

От РНИИ КП (г. Москва):

в области управления системами наведения наземных антенн: Белянский П. В., Сергеев Б. Г.

От Санкт-Петербургского государственного университета авиационного приборостроения:

в области системного анализа, управления и обработки информации: Орурк И. А., Коновалов А. С., Захаров В. М., Петухов Л. Г.

От Санкт-Петербургского госуниверситета:

в области идентификации математических моделей механической части АУ:

Черных К. Ф., Мальков В. М.;

в области процессов управления динамическими объектами: Зубов В. И., Горьковой В. Ф.

От Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета:

в области идентификации математических моделей АУ по результатам натурных испытаний АУ: Соколовский Г. Г., Постников Ю. В., Стасовский В. М.

От Государственного университета (Нижний Новгород):

в области процессов управления динамическими объектами: Неймарк Ю. И., Брусин В. А.

От Физико-технического института (Государственный университет, Нижний Новгород):

в области систем программного управления АУ: Эйнгорин М. Я.

От института автоматизации производственных процессов (Ростов-на-Дону):

в области идентификации математических моделей радиосистем автосопровождения космических объектов: Клепфер Е. И., Шапошников К. Я., Дудченко-Дудко В. В.;

в области интеллектуальных систем управления:

от Санкт-Петербургского государственного технического университета:

Ерофеев А. А.

Авторы благодарят всех участников работ по созданию радиотелескопа РТ–70, чьи имена не вошли в приведенный выше список.

Основные научные идеи и результаты, изложенные в настоящей книге, нашли свое непосредственное воплощение в ряде НИР, ОКР и рабочих проектов действующих антенных установок и радиотелескопов, а также в НИР по фундаментальным научным проблемам тематики ИПМаш РАН.

Здесь следует перечислить непосредственных исполнителей научных исследований в течение 10 лет (2004–2014 гг.), финансируемых из бюджетных средств проекта «Суффа». Это прежде всего сотрудники лаборатории интеллектуальных электромеханических систем ИПМАШ РАН: Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л., Кулик Б. А., Фарафонов Ю. П.

В последние годы получению новых результатов по созданию радиотелескопа РТ–70 с адаптивной поверхностью по проекту «Суффа», по мнению авторов, в наибольшей степени содействовали:

1.	Гимельман В. Г. Научное и техническое руководство в функции главного конструктора РТ–70 Суффа
2.	Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Отработка методов технической реализации средств контроля положения элементов зеркальной системы и опорно-поворотного устройства радиотелескопа РТ–70 (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО))
3.	Шесняк С. С. Исследование влияния возмущающих факторов зеркальной системы РТ–70 на объемное распределение электромагнитного поля космических источников радиоизлучения в фокальной области (ООО «Научный центр прикладной электродинамики» (ООО «НЦ ПЭ»))
4.	Соколовский Г. Г., Постников Ю. В. Разработка алгоритмов управления и инструментальных средств для реализации электроприводов наведения радиотелескопа РТ–70 (ОАО «Научно-инженерный центр электротехнического университета (ОАО «НЦ СПбЭТУ»))

5.	Боровков А. И., Шевченко Д. В. Конечно-элементное исследование металлоконструкций и зеркальной системы и разработка метода компенсации деформаций конструкции радиотелескопа за счет управления адаптивной отражающей поверхностью. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
6.	Вдовин В. Ф., Зинченко И. И. Отработка методов технической реализации радиоприемных устройств РТ. Институт прикладной физики РАН (г. Н. Новгород)
7.	Казаринов А. С., Петров В. В. Отработка геодезических методов измерения и юстировки положения элементов конструкции РТ (ЗАО «БУМ ТЕХНО»)
8.	Егоров Ю. Г. Исследование и отработка гироскопической инерциальной системы ориентации (ИСО) зеркальной системы радиотелескопа РТ–70 (ООО «НПП «Спектр», г. Москва)
9.	Юсов А. В., Козлов С. А. Разработка подсистемы управления исполнительными механизмами на основе гексаподов для отработки принципов управления многозвенными динамическими объектами типа «Контррефлектор», «Перескопическое зеркало» (ООО «Прикладная механика», г. Москва)
10.	Шкодырев В. П. Потехин В. В. Разработка макета системы управления РТ–70 с адаптивной поверхностью зеркальной системы и отработка методов и средств ее автофокусировки
11.	Епифанов О. К. Разработка электропривода актуатора для адаптивного регулирования отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа РТ–70. Гусинский В. З., Литманович Ю. А. Исследование и отработка гироскопической инерциальной системы ориентации (ИСО) зеркальной системы радиотелескопа РТ–70 (ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор»)
12.	Нечаев А. И. Отработка методов технической реализации телеметрической системы (ТМС) автоматического контроля взаимного положения щитов адаптивной поверхности главного зеркала (ООО «ТАИР»)
13.	Бондаренко С. М. Отработка методов восстановления отражающей поверхности главного зеркала (ГЗ) нанесением покрытий способом ХГН управляемым робототехническим комплексом (ООО «Прима-технология»)
14.	Козырев В. В., Федотов О. В. Разработка конструктивных узлов крепления и перемещения щитов отражающей поверхности главного зеркала. Владимирский государственный технический университет

В связи с неуклонным ростом требований к точности формирования динамических процессов в сложных электромеханических системах современные методы их анализа и синтеза все меньше удовлетворяют целям функционирования таких систем. Одной из причин неудовлетворенности является недостаточная изученность их поведения и связанная с этим проблема создания адекватных математических моделей подвижных (динамических) объектов (ДО). Кроме того, сами требования часто плохо формализуются, носят декларативный характер. Другой причиной является чрезмерная вычислительная трудоемкость методов формирования динамических процессов, то есть процессов управления.

Задачи автоматического управления условно можно разделить на два класса: класс задач проектирования, в которых решаются принципиальные вопросы построения регуляторов объектов управления в соответствии с принятыми критериями качества, и класс задач функционирования ДО в реальном времени.

Проблемы, стоящие в задачах проектирования, и специфика принятия проектных решений при создании традиционных систем управления хорошо известны, сравнительно четко обозначены и изучены. В итоге эти задачи сводятся к вариационным и решаются с применением методов математического программирования. При этом трудоемкость задач проектных решений не имеет особого значения.

Специфика задач функционирования ДО в реальном времени состоит в том, чтобы периодически за заданный сравнительно малый интервал времени на вычислительном устройстве успеть провести вычисления определенного объема, которые связаны с численным интегрированием систем дифференциальных уравнений, решением системы линейных неравенств, определением значений вещественных и логических функций и др. Результатом вычислений является вектор управляющих воздействий на ДО как объект управления, обеспечивающих получение требуемых динамических процессов с заданной точностью.

В большинстве практических случаев регуляторы ДО, в том числе с самонастройкой и адаптацией к внешним воздействиям, из-за жестких ограничений, связанных с производительностью вычислительных устройств, не содержат решателей, опирающихся на поисковые процедуры, характерные для неклассических методов управления.

При управлении нелинейными нестационарными ДО, на фазовые координаты которых наложены произвольные ограничения типа неравенств, классические методы управления оказываются

непригодными. К числу неклассических задач управления, к которым неприменимы классические методы, можно отнести такие задачи, как управление транспортными средствами при наличии препятствий, парковка транспортных средств с учетом их динамики, управление летательными аппаратами в нечетко определенной обстановке, управление электроприводами наведения крупных радиотелескопов при ограничениях на мощность, ток, крутящий момент и др. Подобные задачи связаны с решением весьма трудоемких неклассических вариационных задач переборными методами.

Действительно, в регуляторах для таких задач логические функции необходимо представлять в форме конечных автоматов с жесткой структурой, синтезированных на стадии проектирования. Реализация подобных регуляторов с поисковыми процедурами для работы в реальном времени является проблематичной. Поэтому требуются новые подходы, позволяющие уменьшать размерность исходной задачи или сокращать число поисковых операций.

Доктор технических наук В. В. Дубаренко

ПРЕДИСЛОВИЕ 2

Строительство комплекса сооружений Международной радиоастрономической обсерватории на плато Суффа было начато в 1984 году на основании постановления ЦК КПСС и СМ СССР от 19 декабря 1981 года. В 1985 году решением ВПК СМ СССР был утвержден план-график работ по изготовлению, поставке, монтажу и наладке оборудования радиотелескопа РТ–70, а также предусматривалось проведение НИОКР для повышения точностных характеристик РТ–70 при использовании в миллиметровом диапазоне волн. К моменту распада СССР и приостановке работ на объекте в 1992 году строительная часть комплекса обсерватории была построена на 50%, а радиотелескопа на 45%. Из предусмотренных сметой расходов средств на сооружение обсерватории в объеме 56, 3 млн руб. было освоено 35, 2 млн руб.

Исходя из фактически выполненных работ на объекте, развития в миллиметровой радиоастрономии в мире, потребности в крупных радиотелескопах мм диапазона для фундаментальных и прикладных задач, в том числе для наземных и наземно-космических радиоинтерферометров, а также отсутствие возможности их строительства на территории России по географическим и астроклиматическим параметрам привело к необходимости подготовки соответствующего международного договора между Россией и Узбекистаном. В итоге 27 июля 1995 года было подписано Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Узбекистан о создании Международной радиоастрономической обсерватории на плато Суффа в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 26 июня 1995 года № 620. Соглашение вступило в силу на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 27 декабря 1995 года № 1769-р.

1. Уникальность в России и в мире

Еще во время строительства радиообсерватории Госстрой СССР присвоил объекту статус, в первую очередь благодаря создаваемому радиотелескопу РТ–70. Статус был подтвержден в 2005 году межгосударственной экспертизой. Это ужесточило некоторые требования к возводимым сооружениям объекта, в частности, была увеличена сейсмичность на 1 балл участков строительства и, соответственно, объектов строительства. Сейсмичность РТ–70 была определена в 8 баллов.

Как и все крупные радиотелескопы мира мм диапазона длин волн, а их немного, РТ–70 уникален. Это определяется и его расположением в центре Евразийского континента, где на тысячи кило-

метров от него нет подобных инструментов, высокогорья, хорошего астроклимата, отсутствия промышленных радиопомех, что делает его крайне важным и необходимым инструментом в отечественных и международных наземных и наземно-космических радиоинтерферометрических наблюдениях в мм диапазоне волн. Конструкция РТ-70 пилонного типа, что отличает его от зарубежных инструментов и обеспечивает ему, как и у прототипов антенн П 2500 в Евпатории и Уссурийске, высокое качество работы. Как и другие мм телескопы РТ-70 будет иметь адаптивную поверхность главного зеркала. А вот постоянно работающих систем контроля поверхности, а их на РТ-70 две: оптико-электронная и телеметрическая, на сегодня ни у кого нет. Для повышения точности наведения и сопровождения на РТ-70 будет установлено гиросtabilизированная платформа (НИР в ЦНИИ АП им. ак. Пилюгина успешно завершен), которая вместе с оптико-электронной системой измерения азимутальный углов позволит достичь предельных значений наведения вплоть до 1, 5–2 угл. сек. И этого тоже нигде нет. Принципиально иной становится и система управления телескопом. Теперь она многоуровневая, объединяет все системы и исполнительные механизмы и обеспечивает функции измерения, вычисления, управления и исполнения движений основных элементов телескопа и приемных устройств.

2. Оценка объемов финансового обеспечения завершения строительства комплекса МРАО «Суффа»

В результате выполнения подготовительного этапа реализации Соглашения были определены начальные долевые вклады Сторон в создании обсерватории, составляющие 30210,0 тыс. долл. США.

Сметная стоимость завершения строительства по заключению межгосударственной экспертизы по состоянию на 01.01.2005 составляет 59980,0 тыс. долл. США, в том числе:

- по обязательствам РУз на внеплощадочные инженерные сети – 2947,67 тыс. долл.;
- по обязательствам РФ – 1582669,33 тыс. руб. (57033,13 тыс. долл.), из них на объекты производственного и жилого назначения и внутриплощадочного инженерного обеспечения – 450053,36 тыс. руб. (16218,14 тыс. долл.);
- на радиотелескоп РТ-70 – 1132615,97 тыс. руб. (40814,99 тыс. долл.).

Объем долевого финансирования РФ на завершение строительства комплекса обсерватории с радиотелескопом по состоянию на 1 кв. 2015 года составляет 3,7 млрд руб. в соответствии с методикой расчета (письмо Минстроя РФ от 06.02.2015 № 3004-ЛС/08) к базисному уровню цен 2001 года.

Выделенное финансирование в 2001–2015 годах на выполнение научно-исследовательских работ по разработке современных систем радиотелескопа РТ–70

Для выполнения подготовительного этапа реализации Соглашения по предложению Минфина России с 2001 по 2004 год финансирование работ, связанных с созданием обсерватории на плато Суффа, включая работы по созданию радиотелескопа РТ–70, осуществлялись по статье «Международная деятельность – выполнение соглашений со сторонами СНГ» на основании распоряжений Правительства РФ по закрытым статьям бюджета из средств федерального бюджета отдельной строкой через Президиум РАН в объеме 10728 тыс. руб. ежегодно. С 2005 года в связи со структурными преобразованиями Минфина, изменением бюджетной классификации, а также отсутствием МРАО «Суффа» как юридической организации указанные расходы были переведены Минфином в подраздел «Фундаментальные исследования РАН». Учитывая, что подготовительный этап завершался и уже начался новый этап – проведение НИ-ОКР по созданию современных систем радиотелескопа РТ–70, который вел ФИАН как головная научная организация РАН, Минфин согласился определить бюджетополучателем указанных средств ФИАН. Финансирование поступало в ФИАН по статье «прочие расходы» базового финансирования. В дальнейшем финансирование неоднократно директивно сокращалось и в 2014 году составило 8864,0 тыс. руб. и передано в ФАНО России в объеме субсидий на выполнение государственного задания. На 2015 год объем субсидий на выполнение государственного задания по теме «Суффа» составил 8420,8 тыс. руб.

3. Срок ввода в эксплуатацию и использование после

В соответствии с ТЭО проекта завершения строительства комплекса обсерватории, получившим положительное заключение межгосударственной экспертизы, срок ввода в эксплуатацию определен 5 годами с начала возобновления работ. Это определяется технологическими циклами проводимых работ на телескопе: выпуска конструкторской документации, изготовления или покупки оборудования и его транспортировки на объект, монтажных и пусконаладочных работ. Строительная часть комплекса обсерватории должна быть завершена в течение трех лет. Срок использования радиотелескопа РТ–70 в соответствии с ТЗ составляет не менее 50 лет.

4. Потенциальная вовлеченность отечественных производителей, включая использование или разработку высоких технологий, в реализацию. Возможность коммерциализации технических разработок. Необходимость вовлечения зарубежных организаций-партнеров

Уже в ходе подготовительного этапа реализации Соглашения по согласованию с Минфином и Минобрнауки России возобновились научно-исследовательские работы по разработке современных систем радиотелескопа РТ-70. Анализ ранее проведенных работ и зарубежный опыт по созданию мм радиотелескопов, а также развитие компьютерного моделирования, элементной базы и принципиально нового оборудования привело к необходимости совершенствования ряда систем, а в некоторых случаях к разработке новых систем радиотелескопа. И это при том, что конструкция РТ-70 в силу заложенных в нее характеристик полностью удовлетворяет требованиям телескопа мм диапазона. К работе были привлечены в основном новые организации – академические и вузовские, где наблюдалось развитие науки и ее прикладное применение в тех областях, которые требовались для РТ-70. Из старых организаций продолжили работу: КБСМ – главный конструктор РТ-70, которое впоследствии вышло из кооперации после ликвидации антенного направления; ЛЭТИ – разработчик приводов РТ-70. Обе организации из Санкт-Петербурга. Из академических организаций по проекту «Суффа» сейчас работают ИПМаш РАН – разработчик многоуровневой системы управления РТ-70 и ИПФ РАН – разработчик научно-аппаратурного комплекса РТ-70. Из университетов кроме ЛЭТИ работают СПб «ЛИТМО», СПб ГПУ, Владимирский ГУ, Рязанский ГУ, МГТУ им. Баумана. От промышленности участвовали ЦНИИАП им. ак. Пилюгина и ЦНИИ «Электроприбор». Обе организации полностью выполнили поставленные перед ними задачи по разработке гиростабилизированной платформы наведения РТ-70 и актуаторов системы адаптации панелей главного зеркала РТ-70 и готовы приступить к их производству. Продолжает работу НПО «Таир» (СПб).

В работе принимают участие и малые, так называемые инновационные, предприятия. К ним относятся многопрофильное НЦ ПЭ (СПб), ставшие недавно ОАО, НЦ ПМ (г. Москва) – по разработке гексапода и его управления для контррефлектора РТ-70.

Что касается привлечения к работам по РТ-70 отечественных производителей, то у нас есть согласие на участие в работах концерна ВКО «Алмаз-Антей» и в первую очередь НПО «Обуховский завод» – изготовление и монтаж оборудования РТ-70 и КБСМ – в части перевыпуска КД. К строительно-монтажным работам есть возможность привлечь одно из предприятий, строящих космодром «Восточный», – партнера Обуховского завода.

Кратко перечислим законченные и продолжающиеся разработки, которые можно отнести к высоким технологиям, и их возможное распространение, а также коммерциализацию:

а) ЛЭТИ – разработка новых приводов для РТ–70. По заданию заказчика АКЦ ФИАН были разработаны новые приводы в одинарном исполнении, то есть взамен приводов для режимов «Быстро» и «Медленно» и их дублирования по азимуту и углу места осталось только по одному приводу для всех режимов. Для обеспечения их надежности приводы оснащены встроенной системой диагностики и предупреждения отказов. Тем самым удалось сократить количество приводов в 2 раза, а также в 2 раза питающих их трансформаторов, силовых кабелей и приборов электроавтоматики. Экономия средств составила порядка 40 млн руб., что уже учтено в смете расходов на создание РТ–70. Кроме этого, приводы обладают повышенной скоростью, позволяющей РТ–70 сопровождать низколетящие спутники, а также наблюдать приближающиеся к Земле с высокой скоростью астероиды. У существующих в России больших антенн такой возможности нет. На основе разработок для РТ–70 «Суффа» ЛЭТИ совместно с КБСМ и НЦ ПЭ смог в короткие сроки (2012–2015 гг.) разработать, изготовить, смонтировать и ввести в эксплуатацию на П2500 (РТ–70) в Уссурийске новую цифровую систему управления приводами главного зеркала и контррефлектора;

б) ЛИТМО – разработана лазерная оптико-электронная система контроля группового положения (8–10) щитов отражающей поверхности главного зеркала, контррефлектора и азимутальной оси относительно наземных реперов в реальном масштабе времени со средней скоростью 15 мин. за цикл. Изготовлены экспериментальные образцы оборудования. Точность системы – 80 мкм и 1,5 угл. сек. Ведется стендовая отработка. Подобной системы в целом нет нигде в мире;

в) НПО «Таир» – разработана внутригрупповая (8–10 счетов) телеметрическая система на оптико-электронных и телевизионных модулях. Точность системы до 50 мкм. Изготовлены экспериментальные образцы. Ведется стендовая отработка. На радиотелескопах такие системы нигде не применяются;

г) СПб ГПУ – впервые в стране была разработана конечно-элементная модель зеркальной системы радиотелескопа, что позволит при выпуске нового КД на РТ–70 внести существенные изменения в КД, в технологию монтажа и технологию геодезических работ, повышающие точность изготовления каркаса зеркала, монтажа актуаторов щитов, опор контррефлектора.

Полученный опыт был использован при моделировании ОПУ в 3D формате РТФ–32 в Светлом ИПА РАН для выявления причин аварии и устранения конструкторских и технологических ошибок;

д) ОАО «НЦ ПЭ» СПб впервые в стране была разработана электродинамическая модель на основе физической оптики зеркальной системы радиотелескопа, являющейся основой для построения аппроксимирующего параболоида главного зеркала и положения КР в системе управления РТ-70. Организация вошла в кооперацию АКЦ ФИАН по проекту «Спектр-М» («Миллиметрон»), выполнила несколько вариантов электродинамических моделей как на основе физической оптики, так и геометрической для разных вариантов оптической схемы. Является разработчиком системы адаптации космического телескопа «Миллиметрон»;

е) ОАО ЦНИИ «Электроприбор» СПб разработал актуатор системы адаптации РТ-70 на основе разработанной ВЛГУ ролико-винтовой передачи. Точность перемещения актуатора не более 1 мкм. Габаритно-весовые характеристики вдвое меньше, чем у итальянских актуаторов, установленных на телескопах в Мексике и на Сардинии. Изготовлен опытный образец, прошедший полный цикл отработки и испытаний. Может быть запущен в серийное производство. Для РТ-70 необходимо изготовить с учетом ЗИПа 1500 шт.;

з) МГТУ им. Баумана совместно с ОАО «ЦНИИ АП им. ак. Пилюгина». Разработана инерциальная система ориентации радиотелескопа РТ-70 на базе трехосного гиростабилизатора и высокоточных аксельрометров и звездного датчика. Точность системы на порядок выше, чем у систем наведения, использующих датчики углов, так как не зависит от деформации конструкции телескопа и составляет 1,5 угл. сек. по азимуту и 2 угл. сек. по углу места. Система не имеет аналогов в мире;

и) ООО «НЦ ПМ» Москва. Ведется разработка конструкции гексаподного механизма с системой управления для перемещения контррефлектора. Организация имеет опыт разработки и изготовления гексаподов для стендового оборудования. Для антенн у нас в стране такие механизмы не разрабатывались;

к) СПб ГПУ – объединенный научно-технологический институт. Ведется разработка системы адаптации РТ-70. Разработан и изготовлен комплексный стенд макета фрагмента зеркала РТ-70, оснащенный прототипами актуаторов, системами контроля и гексапода КР и их системами управления. Работа выполняется совместно с ИПМаш РАН, ЛИТМО, «Таир» и НЦ ПЭ. Стенд в дальнейшем будет выполнять функцию демонстрационной модели интеллектуальной системы управления сложными объектами;

л) СПб ГПУ – объединенный научно-технологический институт. Разработка технологии создания функциональных поверхностей зеркала РТ-70 с целью доработки существующих его панелей общей пло-

щадью 3,8 тыс. м² (1200 шт.). Разработан и изготовлен роботизированный комплекс, оснащенный системой измерения поверхностей, механической обработки и устройством газодинамического напыления. Технология, разрабатываемая при участии Новосибирского института теоретической и прикладной механики СО РАН, и сам комплекс защищены патентом РФ и имеют высокую возможность для коммерциализации. В первую очередь для авиационной и космической промышленности, машиностроения, солнечной энергетики и др.;

м) ИПМаш РАН – является ответственным исполнителем работ по теме «Суффа» в существующей кооперации и выполняет разработку многоуровневой интеллектуальной системы управления РТ–70. Подобной системы нигде нет. Разработка системы тесно переплетена с проводимыми ИПМаш РАН фундаментальными исследованиями в этой области. Работы ИПМаш РАН дважды в 2003 и в 2012 году заслушивались на бюро отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН под руководством ак.-секретаря отделения ак. В. Е. Фортова и были одобрены. По результатам последнего рассмотрения в Программу фундаментальных исследований государственных академий на 2013–2020 годы в раздел III Технические науки в п. 32 интеллектуальные системы управления был включен пункт: «создание интеллектуальных систем управления наземных и космических радиотелескопов миллиметрового диапазона, в том числе высокоточных систем наведения и активной виброзащиты на основе механизмов параллельной структуры».

Результаты выполненных разработок новых систем радиотелескопа РТ–70 нашли свое отражение в более чем в 100 публикациях в специализированных научных журналах, в том числе порядка 20 в зарубежных изданиях. Получено 10 патентов РФ на изобретения. Подготовлено и защищено 12 кандидатских диссертаций по тематике РТ–70. Это также подчеркивает высокий научный уровень разработок систем РТ–70.

5. Оценка геополитических, организационных, технических рисков реализации инфраструктуры

К проекту постановления Правительства РФ о подписании Соглашения о создании МРАО «Суффа», подготовленным МИДом России, в соответствии с Законом РФ о международных договорах прилагались технико-экономическое обоснование и пояснительная записка с изложением имеющихся рисков его реализации.

Оценка рисков в настоящее время:

а) геополитические риски – низкие

Эти риски следует рассматривать в контексте политического взаимодействия России и Узбекистана. По мнению МИДа России, во-

прос реализации Соглашения является не только научным, но и политическим. С 1992 года и по настоящее время в отношениях между нашими странами наблюдались периоды как потепления, так и охлаждения. При этом, как подчеркивается Посольством России, в Узбекистане отношения в области культурно-гуманитарного и научно-технического сотрудничества всегда поддерживались на высоком уровне. В целом геополитическая ситуация между Россией и Узбекистаном благоприятная, что зафиксировано в Директивах действий на узбекистанском направлении на среднесрочную перспективу, утвержденных Президентом РФ от 24 июля 2013 года, и в записке МИДа России по итогам визита Президента РФ в 2014 году, прилагаемой к поручению Президента РФ от 27 января 2015 года № Пр-130;

б) организационные риски – средние

Такие риски были и остаются сейчас. Они касаются порядка реализации Соглашения и взглядов на создание МРАО «Суффа» как юридической организации, имеющих место между Минобрнауки России и РАН. С подключением в этот процесс ФАНО России ситуация осложнилась. Вопрос возник по завершению подготовительного этапа реализации Соглашения, когда нужно было принимать решение о возобновлении строительства и, соответственно, выделении на это финансовых средств. На межведомственном совещании по этой теме в соответствии с поручением Правительства РФ от 15.02.2008 № СИ-П7-957 Минфин спросил, кому выделять средства на строительство. Как оказалось, некому. РАН не могла вести строительство за рубежом по своему статусу, Минобрнауки отказалось, поскольку не занимается строительством, МРАО «Суффа» могла, но ее не было как юридического лица. В дальнейшем, договорившись с узбекской стороной, было принято решение, зафиксированное в Плане мероприятий Программы экономического сотрудничества между Правительством РФ и Правительством РУз на 2008–2012 годы (п. 6.3), о государственной регистрации МРАО «Суффа» и завершении ее строительства, где ответственными исполнителями с российской стороны являлись Минобрнауки и РАН. Однако вопрос с уставом так и не сдвинулся с места. Узбекская сторона, не дождавшись предложений от России, разработала свой вариант устава и направила его в 2011 году в Россию для согласования. Но и это не помогло.

В то же время Администрация Президента РФ признает необходимость создания МРАО «Суффа» для проведения фундаментальных и прикладных исследований, что помимо Соглашения было зафиксировано в межправительственной космической программе, подписанной в 2008 году. Также политическую значимость создаваемого объекта отметили в Директивах действий на узбекистанском

направлении, утвержденных Президентом РФ в 2013 году (пункт о подготовке устава МРАО «Суффа»). Ответственными организациями здесь также являлись Минобрнауки и РАН. По завершению официального визита в декабре 2014 года в Узбекистан Президент РФ заявил, что: «В научно-техническом сотрудничестве наиболее важный проект – сооружение на территории Узбекистана международной радиоастрономической обсерватории «Суффа». Она будет оснащена крупнейшим радиотелескопом РТ–70, который позволит осуществлять уникальные научные исследования, в том числе в сфере космической связи» (официальный сайт Президента России). По итогам визита в Узбекистан вышло поручение Президента РФ от 27 января 2015 года № Пр–130, в котором Президент РФ согласился с предложением МИДа России об ускорении выполнения наших обязательств по межправительственному Соглашению 1995 года о создании МРАО «Суффа». В рамках выполнения этого поручения РАН обратилась в Правительство РФ о возложении на ФАНО России функции «головного исполнителя» по созданию МРАО «Суффа» (поручение Аппарата Правительства РФ от 22 июня 2015 года № П8–31149). Минобрнауки и МИД с предложением РАН согласились.

ФАНО России заявило, что в его компетенции отсутствуют действующие нормативные правовые акты для исполнения функции «головного исполнителя». Минобрнауки России в ответ предложило Аппарату Правительства РФ провести совещание и поручить ФАНО России подготовить проект распоряжения Правительства РФ о расширении функций ФАНО России для исполнения им функций головного исполнителя по созданию МРАО «Суффа»;

в) технические риски – низкие

Особых рисков при строительстве комплекса обсерватории не предвидится. Риски изготовления вновь спроектированных систем и оборудования также низки. Практически все оборудование, как и ранее, предлагается изготавливать на российских предприятиях. С целым рядом из них такая договоренность имеется, в частности, с концерном ВКО «Алмаз-Антей», ЦНИИ «Электроприбор», ЦНИИ АП им. ак. Пилюгина, ОАО «РКС», ОАО «ЛОМО».

В мире построены целый ряд мм радиотелескопов, таких как 30 м в Испании, 50 м в Мексике, 64 м на Сардинии, комплекс «Альма» из 64 и 12 м антенн субмиллиметрового диапазона и др. В проектировании и частично изготовлении многих из них принимала участие немецкая компания «MT Mechatronics», входящая в международную компанию «Aerospace». Несколько лет назад была встреча с руководством и специалистами этой компании, где мы рассказывали о нашем проекте РТ–70, а они о своих новых разработках.

Общее мнение таково. Наши разработки не уступают немецким, а в некоторых случаях превосходят их. России безусловно по силам реализовать проект «Суффа». В определенной мере мы уступаем Западу в мм приемниках. Но есть надежда, что в ближайшие годы развитие отечественной микроэлектроники в рамках программы импортозамещения позволит решить и этот вопрос.

6. Наличие и/или необходимость создания технического задела в России

По большинству позиций оборудования и комплектующих изделий для РТ–70 технический задел имеется в России. По отдельным позициям, где такого задела нет, проводятся НИР с изготовлением экспериментальных образцов, стендов и отработки технологий, что позволит выявить потенциальных изготовителей, способных реализовать выполненные разработки.

Оценка количества научных организаций и индивидуальных пользователей инфраструктуры, которые будут вовлечены в решение на ней научных задач

РТ–70 обсерватории «Суффа» планируется как инструмент коллективного пользования. Стартовый консорциум состоит из России и Узбекистана, в дальнейшем предполагается подключение широкой коллаборации стран участников РСДБ сообщества, в частности, собравшейся ныне на площадке проекта Радиоастрон. Создаваемый в рамках международной обсерватории его использование предполагается с участием российских и международных организаций. Проект «Миллиметронтрон», в котором будет участвовать РТ–70 «Суффа», также является международным проектом.

Что касается наших дальнейших работ в этом направлении, то они сосредотачиваются вокруг разработки системы управления телескопом. Это ядро всех разработок, поскольку достижение главных задач телескопа – повышение его чувствительности, углового разрешения и точности наведения – зависят от возможности управления в реальном режиме времени коррекцией формы поверхности и элементов зеркальной системы, высокоточного наведения ЗС РТ на КО с учетом внутренних и внешних факторов, обработки огромного массива информации, визуализации процессов и документирования. Выполнить это методами классического управления не представляется возможным. Поэтому система управления телескопом строится на основе интеллектуальных распределенных систем с нейросетевым базисом и применением многопроцессорных систем на основе нейрокомпьютеров.

Кандидат технических наук Ю. Н. Артеменко

СПИСОК АББРЕВИАТУР И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПМК – пространственная металлоконструкция

АП – аппроксимирующий параболоид

АЭ – аппроксимирующий эллипсоид

ГЗ – главное зеркало

АОП – адаптивная отражающая поверхность

ОК – опорное кольцо

КР – контррефлектор

ПЗ – перескопическое зеркало.

СК – система координат

ИС – инерциальная система

ЦДОС – цифровой датчик углового перемещения главной обратной связи

ГО – горизонтальная исполнительная ось

ВО – вертикальная исполнительная ось

ЦТ – центральная труба основания ГЗ

ФОГЗ – фокальная ось

ГЗ – воображаемая линия АП ГЗ, проходящая через его вершину и фокус

ФОКР – фокальная ось

КР – воображаемая линия аппроксимирующего эллипсоида (АЭ) КР, проходящая через его вершину и фокус

КИР – космический источник радиоизлучения

КП – картинная плоскость – воображаемая плоскость электромагнитной волны удаленного точечного источника радиоизлучения (КИР)

ЛВ – линия визирования удаленного КИР – нормаль к картинной плоскости

ДНА – диаграмма направленности зеркальной системы при приеме на точечный приемник

Характерные точки

О – начало наземной системы координат (пересечение вертикальной исполнительной оси с плоскостью строительной горизонтали)

O_{az} – точка установки цифрового датчика главной обратной связи по азимуту

А – левая цапфа

В – правая цапфа

D – точка пересечения плоскости хz с угломестной осью

O_1 – вершина основного зеркала

F_1 – фокус основного зеркала

O_2 – вершина контррефлектора

F_2 – фокус контррефлектора
 R_{os} – центр тяжести основания
 R_{oz} – центр тяжести основания зеркала
 R_z – центр тяжести главного зеркала
 R_s – центр тяжести ригеля контррефлектора
 R_k – центр тяжести контррефлектора
 R_p – центр тяжести противовеса
 R_{pl} – центр тяжести платформы
 O_3 – вершина перескопического зеркала
 O_4 – центр облучателя (в плоскости раскрыва облучателя)
 F_c – фазовый центр облучателя
 O_5 – центр плоскости верхнего опорного кольца
 O_g – начало координат гиropлатформы
 Z_e – точка коренного зацепления по углу места
 Z_{al} – точка коренного зацепления по азимуту левая
 Z_{ap} – точка коренного зацепления по азимуту правая

Характерные оси

LV – линия визирования объекта излучения
 AZ – азимутальная ось
 UM – угломестная ось
 PR – ось программного целеуказания
 DO – ось, определяемая показаниями датчиков главной обратной

связи

FA – фокальная ось главного зеркала
 FK – фокальная ось контррефлектора
 FP – фокальная ось перескопического зеркала
 FO – ось облучателя

Характерные плоскости

PEV – плоскость потока радиоизлучения КИР
 PSN – плоскость строительной горизонтали
 PGZ – плоскость раскрыва главного зеркала
 PKR – плоскость раскрыва контррефлектора
 PAM – угломестная плоскость
 PPZ – плоскость перескопического зеркала
 PRO – плоскость раскрыва облучателя (поверхность многопиксельной матрицы чувствительного элемента радиоприемника)
 POK – плоскость верхнего опорного кольца
 PNP – наклонная плоскость

Характерные поверхности

SGZ – поверхность главного зеркала
 SKR – поверхность контррефлектора
 SPZ – поверхность перескопического зеркала

Основные системы координат

WSC – неподвижная мировая система координат, связанная с цифровыми датчиками гиросплатформы, измеряющими угловое положение основания ЗС; начало в точке O_g

GSC – подвижная наземная декартова система координат трех ортогональных векторов:

$x_0' = [100]$, направлена на Восток

$y_0' = [010]$, направлена на Север

$z_0' = [001]$, направлена в Зенит

Начало в точке $O' = [000]$

ASC – подвижная система координат, связанная с цифровым датчиком главной обратной связи по азимуту; начало в точке O_{az}

ESC – подвижная система координат, связанная с цифровым датчиком главной обратной связи по углу места; начало в точке A

OSC – подвижная система координат, связанная с верхним опорным кольцом

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы обнаружения и идентификации удаленных космических объектов и приема слабых радиоизлучений (РИ) от них возникают во многих областях радиоастрономии, космонавтики и ракетно-космической обороны. Антенные установки, предназначенные для этих целей, получили название радиотелескопов (РТ).

Системы наведения (СН) РТ предназначены для перенаправления принимаемого от космического источника радиоизлучения (КИР) потока энергии в радиоприемник (РП) посредством системы отражающих поверхностей (зеркал). Зеркальная система (ЗС) РТ строится таким образом, чтобы пространственно-временные характеристики РИ в точке расположения приемника были бы наилучшими для радиоприема. РИ в миллиметровом (мм) диапазоне частот позволяют реализовать самую высокую угловую разрешающую способность как при использовании отдельных РТ, так и с помощью радиоинтерферометров. В мм диапазоне резко уменьшаются эффекты рассеяния и поглощения РИ в космической плазме (по сравнению с более длинными волнами), что позволяет обнаруживать наиболее компактные объекты, исследовать их внутреннюю структуру, переменность и поляризационные свойства. Наконец, астрономические объекты обладают в мм диапазоне необычайно богатым набором излучения атомов и молекул в спектральных линиях.

Сложность обнаружения наблюдения и идентификации таких объектов и сигналов во многом объясняется отсутствием современных инструментальных средств и недостаточным развитием теории идентификации в условиях большой информационной неопределенности и сильной зашумленности. Успехи в этом направлении в настоящее время во многом связывают с развитием инструментальных средств мм диапазона и в особенности больших наземных полноповоротных РТ. Именно поэтому передовые страны (США, Япония и др.) уделяют огромное внимание созданию больших РТ мм диапазона, вкладывая значительные финансовые средства.

Существует несколько нерешенных до сих пор основных проблем создания указанных РТ. Во-первых, проблема заключается в том, что при наведении РТ на КИР под воздействием гравитационных, тепловых, ветровых и инерционных сил возникают некомпенсируемые деформации элементов ЗС. Это приводит к расфокусировке ЗС и, как следствие, к понижению эффективности радиоприема.

Следующей основной проблемой при создании РТ мм диапазона является проблема синтеза вещества (материала), определяющего чувствительность РП к потоку РИ в этом диапазоне и разрешающую способность РТ принимать РИ от разных КИР при малых

угловых расстояниях между ними. Чувствительность и разрешающая способность – два различных качества РТ, и реализуются они различными средствами. Первое – созданием РТ с большой апертурой антенн, а второе – созданием множества РТ с малой апертурой антенн. Высокая чувствительность позволяет видеть во Вселенной удаленные КИР с малыми интенсивностями потока РИ, а разрешающая способность – отличать их друг от друга.

Взаимодействие потока радиоизлучений с веществом, из которого состоит чувствительный элемент радиоприемника (РП), вызывает волновые процессы в самом веществе и окружающей его среде. Экспериментально эти процессы обнаружены и исследованы путем измерения параметров и свойств вещества и окружающей среды радиоприемного устройства. Эти изменения связаны с энергетическими состояниями электронов, атомов или молекул вещества и окружающей среды, по которым судят о процессах в КИР. Система автоматического управления (САУ) радиотелескопом (РТ) в самом общем виде показана на рис. В1.

Система автоматического управления должна обеспечивать наведение зеркальной системы (ЗС) на космические источники радиоизлучения (КИР) в мм диапазоне с заданным качеством.

Основным назначением САУ радиотелескопом (РТ) является механическое перемещение элементов его зеркальной системы (ЗС) и

Рис. В1. Концепция САУ РТ

радиоприемного устройства (облучателя) в такое положение, которое обеспечивает наилучшие условия приема радиоизлучения от его космического источника (КИР) [1].

Наилучшими условиями приема являются условия, при которых в процессе наведения:

- реальная геометрическая схема конструкции ЗС РТ совпадает с теоретической оптической схемой ЗС;
- направление фокальной оси (ФО) совпадает с направлением на КИР;
- отражающие поверхности зеркал конструкции ЗС РТ совпадают с теоретическими расчетными поверхностями этих зеркал.

Несовпадение указанных факторов приводит к ошибкам наведения РТ.

Угловые координаты КИР обычно задаются в системе координат (СК), связанной с географическим местом Земли, в котором установлен РТ. Относительно этой СК, названной нами Система координат Земли (СКЗ), рассчитывается программа целеуказания КИР, в которой для дискретных моментов времени с высокой точностью учитываются все астрономические и астрофизические поправки, связанные с нутацией, прецессией, параллаксом и др. отклонениями Земли как динамического объекта, движущегося в мировом пространстве. СКЗ, условно принимаемая неподвижной (инерциальной), является базовой СК и все другие СК, связанные с управлением РТ должны быть к ней привязаны, в том числе и СК КИР. Поэтому движение КИР относительно СКЗ является кажущимся.

Целью управления приводами ГЗ является отработка углового рассогласования между линией, определяющей направление на КИР и осью АП ГЗ. Линия целеуказания КИР задается в форме программы как функция его координат от времени, а угловое положение АП ГЗ должно быть вычислено по результатам измерений координат элементов металлоконструкции РТ. Эта процедура является одной из главных задач управления РТ.

Анализ результатов многолетних исследований НИИР «Суффа» и натурных испытаний на РТ–70 в Евпатории и Уссурийске показал:

Изменение угла места при наведении ЗС на КИР влечет изменение весовых деформаций конструкции ЗС. Поэтому относительно системы координат (СК) опорного кольца (ОК) расчетные координаты вершины и фокуса аппроксимирующего параболоида (АП) главного зеркала (ГЗ) и координаты вершины и фокуса эллипсоида контррефлектора (КР) являются функциями угла места. Это приводит к несовпадению (расфокусировке) координат фазовых центров

(ФЦ) ЗС и облучателя радиоприемника, ухудшению условий приема, вплоть до его срыва.

При наведении ЗС в дм и см диапазонах удовлетворительным считается наведение, при котором угловое рассогласование (ошибка) между координатами КИР и фокальной оси (ФО) ГЗ не превышает 10% от ширины диаграммы направленности (ДНА). В мм диапазоне при длине волны 1 мм ширина ДНА для РТ-70 не превышает 3 угл. сек. Обеспечить наведение ФО АП ГЗ с точностью 0,3 угл. сек. представляется проблематичным.

Перескопическое зеркало (ПЗ) в трехзеркальном варианте ЗС может лишь частично скомпенсировать влияние расфокусировки, вызванной указанными выше причинами, поэтому вместо варианта с ПЗ рассмотрен вариант установки облучателя на специальную управляемую адаптивную платформу облучателя (АПО), подвеска которой может быть выполнена аналогично подвеске КР.

Существующая к настоящему времени система наведения КР РТ-70 предназначена главным образом для компенсации весовых деформаций и является инерционной (медленно действующей), поэтому в динамике лишь грубо обеспечивает компенсацию угловых колебаний КР относительно ГЗ. Для повышения точности наведения ЗС на КИР, СН КР желательно выполнить как следящую систему, отрабатывающую угловое рассогласование между фокальной осью АЭ КР и фокальной осью АП ГЗ, а также линейное рассогласование между координатами фокусов этих поверхностей [1].

В качестве базовой СК ЗС принята СК опорного кольца (ОК) (рис. В2).

В этой системе координат проводится расчет координат аппроксимирующих отражающих поверхностей ГЗ и КР, а также координат фазовых центров, принимаемого радиоизлучения, определяющих желаемое положение облучателя. Координаты фазового центра с помощью электродинамической или корпускулярной модели ЗС рассчитываются как функции отклонений элементов ЗС, вызванных нежесткостью ее конструкции, от теоретических значений, которые имели бы место, если бы конструкция была бы абсолютно жесткой.

Так как угловое положение КИР задается относительно СК Земли, а положение элементов ЗС определяется по результатам измерений в СК ОК, то для преобразования координат элементов конструкции РТ к главной базовой СК требуется решение задачи измерения положения СК ОК в СКЗ.

Измерение положения СК ОК в СКЗ в процессе наведения связано с известными трудностями из-за того, что положение ОК не мо-

Рис. В2. Основная расчетная схема системы наведения РТ

жет быть непосредственно измерено с поверхности Земли, так как не на всех углах места находится в прямой видимости. На этапе юстировки привязка СК ОК к СКЗ может осуществляться по цепи:

- СКЗ – СК левой цапфы горизонтальной оси (ГО);
- СКЗ – СК правой цапфы ГО;
- СК левой цапфы ГО – СК левого торца ГО;
- СК правой цапфы ГО – СК правого торца ГО;
- СК левого торца ГО – СК правого торца ГО – СК базовой площадки (БП ГО) на пересечении ГО с Центральной трубой (ЦТ);
- СК БП ГО – СК ОК.

Статические измерения геодезическими методами углового положения СК ГО с поверхности Земли могут быть проведены с высокой точностью как функции угла азимута. Физически СК БП ГО ориентируется так, что ее ось ОХ совпадает с ГО, а ось ОZ с вектором силы тяжести и, соответственно, с осью ЦТ, фокальной осью (ФО) и осью и осью ОZ СК ОК (при отсутствии деформаций, в зенитном положении).

Все СК являются правыми и прямоугольными (при положительном отсчете углов вращение от $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ осуществляется против часовой стрелки, если смотреть с конца оси). СК ОК находится в прямой видимости внутри ЦТ и ее угловое положение относительно СК БП ГО может быть измерено с высокой точностью посредством лазерных измерительных средств.

В процессе наведения координаты цапфенных узлов, по значениям которых измеряется положение ГО, перемещаются по азимуту, поэтому для непрерывного измерения этих координат непосредственно с Земли на ней вокруг РТ необходима установка высокоточной следящей системы. Измерения непосредственно с Земли (при наличии качественных измерительных средств) являются предпочтительными, так как в этом случае исключаются промежуточные измерения СКЗ – СК платформы (СКП) – СК БП ГО.

Альтернативным вариантом измерения положения СК ОК в СКЗ является применение инерциальной системы ориентации (ИСО) РТ, выполненной в виде гиросtabilизированной платформы (ГСП) на базе двух неуправляемых электростатических гироскопов (НГ) в карданных подвесах, которая устанавливается на БП ГО.

В настоящее время система на двух НГ с электростатическим подвесом ротора является наиболее точной системой навигации и ориентации и представляет собой систему на базе двух НГ, один из которых имеет «полярную» ориентацию вектора кинетического момента, а другой – «экваториальную». Дополнительно в состав ИСО входит трехосный измеритель ускорений ИУТ, служащий источником опорной информации для калибровки инструментальных погрешностей системы при запуске и в процессе работы.

ИУТ используется для измерения вектора кажущегося ускорения (то есть разности вектора абсолютного ускорения и вектора ускорения силы тяжести). Если инерционное ускорение объекта близко к нулю (что справедливо для РТ), ИУТ измеряет проекции вектора ускорения силы тяжести на оси чувствительности акселерометров, что позволяет использовать его для измерения угловой ориентации РТ.

Преимуществом НУЭГ является высокая стабильность дрейфа, более чем на порядок превосходящая лазерные гироскопы [122, 123].

Основным условием определения ориентации с помощью ГСП является непараллельность наблюдаемых векторов. В системах на 2-х НГ это условие обеспечивается путем задания начальной ориентации вектора кинетического момента одного из НГ вдоль оси земного вращения (так называемая полярная ориентация), а второго – в плоскости земного экватора («экваториальная» ориентация). Движение вектора кинетического момента НГ с «полярной» ориентацией относительно инерциальной СК имеет вид гармонических колебаний с суточным периодом и амплитудой, пропорциональной отношению угловой скорости дрейфа НГ к скорости суточного вращения Земли, а движение НГ с «экваториальной» ориентацией представляет собой линейный уход вектора кинетического момента в плоскости

земного экватора. В связи с этим некоторые погрешности выходных параметров ИСО на двух НГ будут иметь вид колебаний с ограниченной амплитудой, а некоторые – расти со временем.

Исследования ИСО на двух НГ, приведенные ЦНИИ «Электроприбор», показали, что при точности знания географических координат места установки РТ не хуже 5–10 м, технически достижимая точность ориентации БП ГО определяется значением, не превышающим 3».

- 1) угловая скорость сопровождения по азимуту – не более 4 '/с;
- 2) угловая скорость сопровождения по углу места – не более 1 '/с;
- 3) гармоническая составляющая угловой скорости сопровождения с амплитудой, не превышающей 1 '/с.

Линейное «отстояние» места установки ИСО от осей привода радиотелескопа:

- 1) от вертикальной оси – 2,5 м;
- 2) от горизонтальной оси – 11 м.

ИСО должна сохранять работоспособность при следующих воздействиях (с восстановлением точностных характеристик по окончании воздействий):

- максимальных скоростях наведения по азимуту – 30 "/с и углу места – 15 "/с;
- максимальных ускорениях наведения по азимуту и углу места – 72 "/с.

На основании значений приведенных из ТЗ параметров углового движения РТ и параметров линейного смещения ГСП относительно осей вращения антенны, по предварительной оценке ЦНИИ «Электроприбор» ошибка от линейных ускорений НГ не превышает 0,1», поэтому при анализе погрешностей ИСО эту составляющую они не учитывают.

Однако остается не ясным, для какого значения линейного ускорения ГСП дается ЦНИИ «Электроприбор» оценка ошибки со значением 0,1».

Есть основания полагать, что при максимальных ускорениях наведения по азимуту и углу места – 72 "/с ошибки от линейных ускорений НГ будут существенно выше.

Таким образом, можно заключить, что с применением ИСО технически достижимая точность ориентации СК ОК определяется значением, не превышающим 4–5».

По предварительным оценкам фирмы БУМТЕХНО точность измерений углового положения БП ГО с Земли лазерными измерителями в динамике будет не хуже, чем с применением ИСО. Выбор окончательного варианта определяется экономической целесообразностью.

Ошибки измерения пространственного положения базовых элементов конструкции РТ не позволяют наводить фокальную ось (ФО) аппроксимирующего параболоида (АП) точнее 5", а фактически ошибка будет еще больше, учитывая динамику.

В инерциальных системах ориентации, построенных на базе трехосных гиросtabilизаторов, для азимутальной выставки или коррекции азимутального положения могут применяться методы автономного азимутального ориентирования, использующие только внутреннюю автономную измерительную информацию. В инерциальных системах ориентации, в которых основным режимом работы трехосного гиросtabilизатора является режим приведения гироплатформы в плоскость горизонта, автономное азимутальное ориентирование или коррекцию азимутального положения гироплатформы целесообразно осуществлять путем измерения токов в каналах горизонтального приведения гироплатформы. Исследования инерциальной системы ориентации (ИСО) зеркальной системы радиотелескопа РТ-70 (ООО «НПП «Спектр», Москва) [2–4] показали, что при использовании звездных датчиков в составе инерциальной системы позволит повысить точность до 1,5–2 угл. сек.

Первоначальное требование к точности наведения ФО АП (10% от ширины ДНА) должно быть изменено.

При наблюдении КИР в мм диапазоне ширина ДНА становится соизмеримой с ошибками измерения пространственного положения базовых элементов конструкции РТ относительно СКЗ, поэтому разрешающую способность РТ по угловым координатам нельзя прямо связывать с точностью наведения.

Применение одиночного приемника с площадью апертуры большей, чем площадь главного интерференционного кольца, в раскрыве облучателя приведет к тому, что в приемник могут попасть излучения от нескольких источников, что сильно затруднит их идентификацию. С другой стороны, уменьшение площади апертуры облучателя приведет к чрезвычайно жестким требованиям к точности наведения, что является проблематичным при создании следящих приводов и измерительной системы.

Применение матричных приемников, представляющих собой пакет облучателей, упакованных в матрицу, подобную ПЗС, применяемой в оптике, позволяет принципиально снизить требования к точности наведения РТ на КИР и одновременно увеличить разрешающую способность за счет одновременного приема сигнала на несколько облучателей.

В связи с изложенным, радиоприем целесообразно вести на матричный приемник (МП), расположенный во вторичном фокусе.

Так как положение фокуса изменяется во времени, положение МП должно изменяться в пространстве за счет установки его на специальную управляемую адаптивную платформу облучателя (АПО) на подвеске, аналогичной подвеске КР, и перемещению по управляющим воздействиям, вычисляемым посредством электродинамической или корпускулярной моделей зеркальной системы (ЭДМ ЗС, КДМ ЗС).

Динамические модели ЗС (ДМ ЗС) описывают структуру и параметры электромагнитного поля или потока РЧ, создаваемого точечным КИР, и его преобразования в ЗС путем переотражения поверхностями зеркал в область пространства, в котором структура и параметры поля наилучшим образом отвечают условиям радиоприема [5].

Практически ДМ ЗС реализуются в виде вычислительного функционального блока, на вход которого подаются значения координат:

1. КИР в СКЗ;
2. СК ОК в СКЗ;
3. и координат пяти точек:

– вершины и фокуса аппроксимирующего параболоида АП ГЗ в СК ОК;

– вершины и двух фокусов аппроксимирующего эллипсоида АЭ КР в СК ОК.

С помощью ДМ ЗС вычисляются значения линейных и угловых координат фазовых центров (ФЦ) РИ в СК ОК.

Рассогласования между значениями линейного и углового положения АПО и ФЦ в СК ОК подаются на ее приводы АПО для отработки.

Значения координат КИР в СКЗ вычисляются астрофизическими приборами с высокой точностью, не отличающейся от точности задания координат для оптических телескопов для заданного географического места их установки.

Точность задания координат СК ОК в СКЗ определяется точностью измерений.

Указанные выше 5 точек рассчитываются по результатам измерений положения щитов отражающей поверхности (ЩОП) ГЗ и отражающей поверхности КР путем построения математических моделей АП ГЗ АЭ КР в статике.

В динамике к значениям этих 5 точек добавляются значения деформаций, снимаемые с динамической модели пространственной металлоконструкции (ПМК) РТ.

Таким образом, СУП и установленный на ней матричный приемник, при подаче на ее приводы управляющих воздействий со стороны ДМ ЗС, будет перемещаться в пространстве и времени так, чтобы

СК МП совместились СК фазового центра (точки максимальной интенсивности излучения вблизи вторичного фокуса).

Задающие воздействия на приводы ГЗ КР однозначно определяются по тем же входным значениям, которые подаются на ДМ ЗС.

Эффективность рассмотренной системы наведения может быть оценена по следующим показателям [7]:

Линейная расфокусировка – линейное расстояние в мм от фокуса до ФЦ в результате деформаций ЗС (определяется для первичного и вторичного фокусов).

Угловая расфокусировка – угловое смещение СК ФЦ деформированной ЗС относительно СК ФЦ недеформированной ЗС (определяется для первичного и вторичного фокусов).

Коэффициент потери интенсивности излучения в ФЦ деформированной ЗС – отношение разности значения интенсивности в ФЦ недеформированной ЗС и значения интенсивности в ФЦ деформированной ЗС к значению интенсивности в ФЦ недеформированной ЗС.

Интенсивность излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям.

Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР деформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям.

Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых имеют отклонения от теоретических, с заданными среднеквадратическими отклонениями.

Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР деформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых имеют отклонения от теоретических, с заданными среднеквадратическими отклонениями.

Коэффициент использования поверхности (КИП) – отношение значения интенсивности излучения в ФЦ недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям к значению интенсивности излучения в ФЦ деформированной ЗС.

Введенные в рассмотрение показатели эффективности могут быть положены в основу критерия качества наведения, минимизация целевой функции которого при заданных ограничениях, сводится к оптимизационной задаче отыскания параметров СН [11].

Точность наведения, оцениваемая по рассогласованию между угловым положением КИР и угловым положением ФО АП ГЗ при рассматриваемой модели СН, является частной задачей, так как не учи-

тывает ошибок, вызываемых отклонением КР и смещением фокусов ЗС. Поэтому более правильной оценкой качества СН, с нашей точки зрения, является оценка по показателю качества – «расфокусировка».

Основные контуры САУ РТ. Система управления большим РТ состоит из 4 основных контуров (рис. В3):

1. Контур управления ГЗ. Наведение ГЗ осуществляется по углу азимута и углу места так, чтобы фокальная ось аппроксимирующего параболоида (АП), построенного по методу наименьших квадратов (МНК) по измерениям реперных точек поверхности ГЗ, совместились с линией визирования КИР.

2. Контур управления КР. Положение КР изменяется так, чтобы фокус и фокальная ось АП ГЗ и фокус и фокальная ось аппроксимирующего эллипсоида (АЭ) КР совместились с минимальными ошибками.

3. Контур управления адаптивной поверхностью ГЗ. Положение щитов ГЗ меняется при помощи электромеханических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля поверхности от рассчитанного АП ГЗ.

4. Контур автофокусировки приемника. По данным о координатах КИР и взаимном положении элементов ЗС с измерительной системы и наблюдателя ПМК с помощью ЭДМ ЗС рассчитываются

Рис. В3. Контуры управления ЗС РТ

координаты фазового центра (ФЦ). Затем определяется управление, выдаваемое на привод АПО, чтобы система координат (СК) приемника совместилась с СК ФЦ. Основной режим работы РТ – это программное наведение, слежение за заданной траекторией КИР. Угловые координаты КИР задаются в СК, связанной с географическим местом Земли (СКЗ), в котором установлен РТ. Относительно СКЗ рассчитывается программа целеуказания КИР, в которой для дискретных моментов времени с высокой точностью учитываются все астрономические и астрофизические поправки, связанные с нутацией, прецессией, параллаксом и т. д. СКЗ является базовой СК и все другие СК, использующиеся при наведении РТ, должны быть к ней привязаны. Наиболее жесткая часть ГЗ – верхняя часть центральной трубы, называемая опорным кольцом (ОК). На нем расположена система лазерных дальномеров (ЛазИС), с помощью которой измеряются координаты реперных точек КР, поверхности ГЗ и приемника. С ОК связана подвижная система координат (СК ОК), в которой производится расчет АП ГЗ, АЭ КР и ЭДМ ЗС.

ЭДМ ЗС реализуется в виде вычислительного функционального блока, на вход которого подаются:

- положение КИР в СКЗ;
- положение СК ОК в СКЗ;
- координаты вершины и фокуса АП ГЗ в СК ОК;
- координаты вершины и фокуса АЭ КР в СК ОК.

С выхода ЭДМ ЗС снимаются значения линейного и углового положений АПО и подаются на ее приводы для отработки.

Координаты вершины и фокуса АП ГЗ в СК ОК в СК ОК и координаты вершины и фокуса АЭ КР в СК ОК рассчитываются по результатам измерений положения щитов отражающей поверхности ГЗ и отражающей поверхности КР путем построения математических моделей АП ГЗ АЭ КР в статике.

В динамике к значениям координат вершин и фокусов АП ГЗ и АЭ КР в СК ОК добавляются значения деформаций, снимаемые с динамической модели пространственной металлоконструкции (ПМК) РТ, реализованной в виде идентификатора состояния (наблюдатель) (рис. В4).

По полученным оценкам с наблюдателя определяются рассмотренные выше координаты КИР $\alpha_{\text{кир}}, \beta_{\text{кир}}$ и ошибки наведения. Ошибки наведения пересчитываются в СК электромеханических следящих приводов (ЭСП) элементов ЗС. В наблюдателе реализована нелинейная редуцированная модель ПМК в виде пространственной системы семи твердых тел, соединенных упругими связями. Входами наблюдателя являются данные с измерительной системы

Рис. В4. Структура САУ РТ

(ЛазИС; ЦДОС – цифровых датчиков обратных связей, расположенных на исполнительных осях; ДУС – датчиков угловых скоростей, используемых для демпфирования резонансных эффектов в ПМК) и управление, выдаваемое на ЭСП элементов ЭС [10] (рис. В5).

В течение 10 лет ИПМаш РАН проводил НИР в рамках проекта «Суффа» с привлечением 15 организаций. Результатом НИР явилось расчетное и аппаратное обоснование современной интеллектуальной системы логического управления РТ–70 с адаптивной поверхностью. Система имеет четыре контура управления: контур управления главным зеркалом, контур управления его адаптивной поверхностью, контур управления контррефлектором на основе гексапода и контур управления третьим (перескопическим) зеркалом (рис. В5.). Система управления позволяет путем автофокусировки элементов зеркальной системы РТ с применением лазерных, гироскопических и оптических средств измерений обеспечить в режиме наблюдения следующие значения углового разрешения на длине волны 1 мм:

- для одиночного приемника – 3 угл. сек.;
- угловое разрешение для многопиксельной балометрической матрицы радиоприемника – 0,25 угл. сек.

Следует ожидать, что в режиме интерферометра совместно с орбитальным РТ проекта «Миллиметр» угловое разрешение может быть улучшено на порядок.

Важнейшими задачами является создание:

- зеркальной системы с регулируемой поверхностью ГЗ путем автономного управления отдельными щитами посредством гексаподов;
- системы управления зеркальной системой РТ методом автофокусировки за счет сканирующих приводов КР, ПЗ и РП;

Рис. В5. Укрупненная структурная схема системы управления ЗС РТ

– компьютерных моделей динамики конструкции РТ и приводов наведения (идентификаторов состояния) для получения оценок их координат, не доступных для прямого измерения;

– системы демпфирования собственных механических частот РТ посредством гироскопических датчиков угловых скоростей (ДУС);

– матричного многопиксельного балометрического приемника, наличие которого в контуре системы управления позволяет достигнуть точности наведения оптической оси РТ лучше 3 угл. сек.

Результаты НИР трижды (в 2003, 2012 и 2015 гг.) заслушивались на бюро отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН под руководством ак.-секретарей отделения РАН ак. В. Е. Фортова и ак. А. Н. Лагарькова, были одобрены и включены в Отчеты Президиума РАН по фундаментальным исследованиям. В рамках проекта по созданию международной астрономической обсерватории «Суффа» издана монография (Радиотелескопы / В. В. Дубаренко, А. Ю. Кучмин, Ю. Н. Артеменко. СПб.: Политехн. ун-т, 2014. 546 с.; рецензент чл.-корр. РАН Д. А. Индейцев), в которой изложены основы создания и технической реализации антенных систем мм диапазона частот для обнаружения удаленных КО (в том числе военного назначения) и оптимального приема информации от них за счет повышения чувствительности, разрешающей способности приемных устройств и точности наведения зеркальных систем.

1. ОБЗОР КРУПНЫХ ПОЛНОПОВОРОТНЫХ НАЗЕМНЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ ММ ДИАПАЗОНА

За всю историю радиоастрономии были разработаны разнообразные конструкции радиотелескопов, но практика показала, что наиболее удобным в работе оказались зеркальные антенны с полноповоротными рефлекторами – аналогами оптических телескопов-рефлекторов. Вопросы создания и управления крупными радиотелескопами отражены в работах ученых и конструкторов: М. Ю. Архипова [11], Л. Д. Бахраха [12], И. С. Виноградова [13], Д. И. Воскресенского [14], М. А. Гурбанязова [15], П. Д. Калачева [16], А. Н. Козлова [15], Г. Г. Соколовского [17, 18], П. В. Бемянского [19], В. С. Поляка [20], В. Б. Тарасова [15] и др.

Существует несколько типовых схем зеркальных систем РТ с параболическим рефлектором:

- 1) с параболическим рефлектором;
- 2) Грегори;
- 3) Кассегрена;
- 4) Нейсмита.

Наиболее распространены двухзеркальные схемы Грегори и Кассегрена. В схеме Кассегрена перед первичным фокусом главного зеркала (ГЗ) устанавливается вторичное зеркало гиперболической формы, которое отражает падающее на него излучение во вторичный фокус, расположенный ближе к вершине ГЗ. Аппаратура становится более доступной в процессе наблюдений, кроме того, облучение вторичного зеркала происходит так, что шумовая температура антенны получается минимальной. Схема Кассегрена является короткофокусной ЗС и менее чувствительна к деформациям конструкции РТ.

Схема Грегори представляет собой вариант двухзеркальной антенны с ГЗ параболической формы и эллипсоидным КР. Контррефлектор устанавливается за первичным фокусом, что допускает возможность работы из первичного фокуса без снятия вторичного зеркала. По схеме Грегори строятся лишь длиннофокусные двухзеркальные антенны, в которых к тому же требуется более высокая точность исполнения контррефлектора, чем в антенне по схеме Кассегрена. Длиннофокусные системы также в значительной степени чувствительны к деформациям ГЗ и взаимному положению ГЗ и КР. Схема Грегори использована на 100-м радиотелескопе в Эффельсберге (Германия) и 100-м радиотелескопе в Грин-Бэнк (Западная Вирджиния).

С целью переключения приемников и задач автофокусировки используется трехзеркальная схема Нейсмита с подвижным пло-

ским зеркалом. Подвижное плоское зеркало (зеркало Нейсмита, или перископическое зеркало) позволяет направлять излучение на выбранный стационарный приемник. Зеркала Нейсмита преимущественно используются в длиннофокусных системах Грегори. В зависимости от схемы ЗС радиотелескоп состоит из следующих основных элементов:

1. Элементы ЗС РТ:

1.1. Главное зеркало (ГЗ), или рефлектор;

1.2. Контррефлектор (КР) (для схем Кассегрена, Грегори и Нейсмита);

1.3. Перископическое зеркало (ПЗ), или зеркало Нейсмита (только для схемы Нейсмита);

1.4. Приемник;

2. Элементы ОПУ РТ:

2.1. Платформа, обеспечивающая поворот ЗС относительно азимутальной оси;

2.2. Основание, обеспечивающее поворот относительно угломестной оси;

2.3. Ферменный каркас, поддерживающий элементы ЗС;

2.4. Ригель, к которому крепиться КР (для схем Кассегрена, Грегори и Нейсмита);

2.5. Противовесы, уравнивающие ферменный каркас, основание, ригель и ЗС.

Полноповоротные антенны имеют большие преимущества перед неподвижными: их можно направлять в любую точку неба, а также осуществлять с их помощью слежение за радиоисточником – накапливать сигнал, что позволяет превышать порог чувствительности приемника и выделять на фоне всевозможных шумов космические радиосигналы предельно малой мощности.

Рабочий диапазон рефлекторной антенны определяется качеством ее отражающей поверхности. Чтобы зеркало телескопа четко фокусировало радиоизлучения (РИ), отклонения поверхности от идеальной параболической не должны превышать одной десятой длины волны ($\lambda/10$). Форма поверхности зеркала должна сохраняться в этих пределах при разных температурах, ветровых нагрузках и положении антенны.

В числе крупных антенн – построенные для целей космической связи 70-метровый параболоид в Евпатории (Крым), 64-метровые рефлекторы в Медвежьих Озерах под Москвой, в Калязине и 70-метровый в Уссурийске.

Крупные параболические антенны построены во многих переловых странах: 64 м (Паркс, Австралия), 100 м (Эффельсберг, Гер-

мания), 100 м (Гран Бэнк, США), антенны миллиметровых волн, работающие вплоть до длины волны ~ 1 мм: 15-м шведский телескоп SEST, установленный в Чили, 30-м телескоп IRAM в Испании и 45-м телескоп Обсерватории Нобеяма (Япония) и др.

Первые полноповоротные радиотелескопы имели традиционное для оптических телескопов экваториальное поворотное устройство, обеспечивающее установку антенны в заданном направлении по прямому восхождению и склонению. Компенсация вращения Земли осуществлялась равномерным вращением инструмента вокруг оси прямого восхождения, устанавливаемой параллельно оси вращения Земли, то есть наиболее простым и удобным поворотным устройством, к тому же обеспечивающим сохранение позиционного угла при сопровождении источника. Однако в этом заключается и его недостаток – в ходе наблюдений зеркало поворачивается вокруг своей оси, и под действием сил тяжести возникают несимметричные деформации, искажающие его форму. Поэтому современные крупные прецизионные РТ имеют азимут-угломестные поворотные устройства.

Следующей особенностью в создании РТ больших диаметров стала разработка конструкции зеркала с азимут-угломестной подвеской, которая деформируется под действием гравитационных сил так, что деформированная поверхность может быть аппроксимирована параболоидом с другим фокусным расстоянием и вершиной, чем у расчетного с погрешностью, не превышающей $\lambda/10$. Данная конструкция получила название гомологической схемы [21, 22] и была реализована на 70-метровом РТ в Евпатории, Уссурийске и 100-метровом РТ в Эффельсберге и других РТ.

С 1970-х годов радиоастрономы пошли по другому пути. Гораздо легче добиться высокого углового разрешения, используя интерферометры, состоящие из нескольких или нескольких десятков небольших антенн диаметром не более 25 м. Если проводить наблюдения за одним и тем же радиоисточником, используя одновременно две антенны, отстоящие друг от друга на расстояние L , и специальным образом обрабатывать поступающие с этих антенн сигналы, то эта система оказывается по угловому разрешению эквивалентной радиотелескопу с диаметром равным L . Такая система называется радиоинтерферометром, а расстояние между антеннами – его базой. Интерферометр может иметь базу в десятки, сотни и даже тысячи километров, радиотелескопы могут находиться на разных континентах, и угловое разрешение в идеале без учета точности наведения будет в тысячи раз выше, чем у отдельной антенны.

За последнее десятилетие построено несколько крупных многоантенных интерферометров. Их называют еще системами апер-

турного синтеза – они позволяют синтезировать апертуру РТ очень больших размеров. В некоторых системах антенны могут перемещаться в пределах определенной площади. Наблюдения за источником проводятся последовательно при разных взаимных положениях антенн. Сигналы обрабатываются на компьютерах. Система по угловому разрешению соответствует радиотелескопу, охватывающему площадь, на которой размещены антенны. С помощью многоантенных интерферометров можно получать синтезированные карты радиоисточников с высоким разрешением. Такие системы эффективно работают в см и мм диапазонах.

В настоящее время работают многоантенные интерферометры VLA (Very Large Array, Нью-Мексико, США), Вестерборк (Голландия), ANTF (Наррабрай, Австралия). В Великобритании функционирует система MERLIN, включающая в себя знаменитый 76-метровый телескоп. В России и Бурятии построен Сибирский солнечный радиотелескоп – специальная система антенн для оперативно-го картографирования радиоизлучения Солнца.

С начала 1970-х годов успешно ведется работа по созданию систем радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Рекордная длина базы L , достигнутая в экспериментах, – около 6000 км. Это почти предел для радиотелескопов, расположенных на земной поверхности, так как база не может превышать диаметра Земли (12,7 тыс. км). В настоящее время на регулярной основе функционирует несколько РСДБ-сетей. В США создана система VLBA, включающая в себя 10 радиотелескопов со средним диаметром 25 м, расположенных на североамериканском континенте, Гавайских и Виргинских островах.

В европейских странах работает система EVN, регулярно объединяющая для РСДБ-экспериментов такие радиотелескопы, как 100-метровый Боннский, 32-метровый в Медичине (Италия), интерферометры MERLIN и Вестерборк.

Несмотря на все положительные качества, системы апертурного синтеза не способны решать задачи по приему сигналов от сверхудаленных космических объектов. Проблема заключается в том, что антенна с малой апертурой, при низкой интенсивности потока РИЭ не в состоянии собрать необходимое количество энергии, чтобы преодолеть порог чувствительности приемника. Поэтому возникла необходимость создания РТ с диаметром более 50 м для работы в см, мм и субмм диапазонах. Чтобы обеспечить эффективный прием миллиметровых волн малой мощности, были разработаны РТ с регулируемыми механически зеркальными системами, способными компенсировать деформации от внешних воздействий.

Например, на 100-метровом РТ GBT (США) [57, 58] ГЗ выполнено в виде параболоида, составленного из отдельных щитов (рис. 1.1). Положение щитов ГЗ меняется при помощи электромеханических актуаторов (рис. 1.1, в) так, чтобы обеспечить минимальное средне-квадратическое отклонение от рассчитанного аппроксимирующего параболоида (АП). Наведение ГЗ осуществляется по углу азимута и углу места при помощи двух электроприводов (рис. 1.1, б). Положение контррефлектора изменяется при помощи пятистепенного привода (рис. 1.1, г) так, чтобы фокус и фокальная ось ГЗ и фокус и фокальная ось КР совмещались по углу с минимальными ошибками.

*Рис. 1.1. Радиотелескоп GBT:
а – общий вид GBT; б – структурная схема GBT; в – главное зеркало с актуаторами; г – контррефлектор и помещение с приемной аппаратурой*

Радиотелескоп 50-метровый РТ GTM (Мексика) [25] помимо адаптивных ГЗ и КР имеет плоское «перископическое зеркало (ПЗ)», которое перенаправляет принимаемый сигнал на выбранный приемник.

Дальнейшее улучшение качества ЗС крупных РТ связано именно с разработкой более совершенных систем активной коррекции профилей зеркал и их взаимного положения, так как создать металлоконструкцию, обладающую требуемой жесткостью, невозможно. Активная коррекция предполагает наличие сложной системы управления ЗС, использующей современные средства измерения с точностью $\lambda/10$, способной прогнозировать деформации ЗС и вырабатывать кооперативное управление приводами элементов ЗС для компенсации этих деформаций. Существуют действующие антенны с регулируемой поверхностью, щиты которых перемещаются с помощью гексаподов, например, как это реализовано в 500-метровом радиотелескопе FAST. Также подобные системы используются для позиционирования зеркал Нейсмита и контррефлекторов (GTM, РТ-13 и др.). Помимо этого, существуют реализации опорно-поворотных устройств на платформе Гью-Стюарта, к примеру, массив анизотропии реликтового излучения им. Ли Юаньчжэ, радиоинтерферометр из 13 элементов (с возможностью расширения до 19) на поворотной 6-метровой платформе, проект ММА, космический радиотелескоп «Миллиметрон» и др.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОСНОВНЫХ ПОДСИСТЕМ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

2.1. Модель корпускулярной системы приема-передчи радиоизлучений

2.1.1. Теория корпускулярной радиосвязи

Отсутствие ясных и простых моделей, описывающих влияние деформаций элементов конструкции зеркальных систем больших радиотелескопов (РТ) на временные и частотные характеристики принимаемых радиосигналов, послужили причиной для разработки новых моделей радиоизлучений (РИ) и систем радиосвязи, основанных на иных физических принципах, чем применяемые ранее. Прежде всего, это касается физической природы РИ. В результате внутриатомных процессов, проходящих в каком-либо теле или от внешних воздействий, его энергия может быть преобразована в РИ, возникающие от изменения энергетических состояний большого числа атомов и ионов, входящих в состав излучающего тела.

Наблюдаемые в природе РИ лежат в широком диапазоне частот (рис. 2.1).

Споры о физической природе РИ касались главным образом диапазона видимого света по причине доступности наблюдательных средств на основе длинного ряда наблюдений над особенностями световых явлений. При этом научные представления о природе света менялись по мере того, как накапливались новые сведения и данные наблюдений. Изучением света занимались такие известные философы, как Пифагор (*VI век до н. э.*), Евклид (*III век до н. э.*),

Рис. 2.1. Диапазон частот радиоизлучений
(расстояния между радиочастицами)

Аристотель (*IV век до н. э.*). Евклид в своих трактатах изложил два закона геометрической оптики, а Пифагор стоял у истоков корпускулярной теории – он предполагал, что тела излучают мельчайшие частицы, которые попадают в глаза, благодаря чему мы видим окружающий нас мир. А Аристотель, по-видимому, стоял у истоков волновой теории – он выдвигал гипотезу о свете, как о возбуждении среды. Позже в соответствии с двумя возможными способами передачи действия от источника к приемнику возникли и начали развиваться две совершенно различные теории о том, что такое свет, какова его природа. Одна из этих теорий связана с именем И. Ньютона, а другая – с именем Х. Гюйгенса.

И. Ньютон придерживался так называемой корпускулярной теории света, согласно которой свет – это поток частиц, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Х. Гюйгенса свет – это поток волн, распространяющихся в особой, гипотетической среде – эфире, заполняющем все пространство и проникающем внутрь всех тел.

Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет И. Ньютона заставлял большинство ученых отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться. Тогда еще не знали линейных размеров корпускул и плотности их в потоке, и не могли определить вероятность столкновения корпускул, которая при современных воззрениях имеет столь низкое значение, что допускает одно столкновение более чем за 1000 лет. Поэтому два луча света и даже лазерных луча, направленных навстречу друг другу, не приводят к столкновению корпускул в обозримое время.

Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

Однако прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить исходя из волновой теории. При корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

Интерференция света

На рис. 2.2 приведена схема классического опыта Юнга, поставленного им в 1801 году. Свет от протяженного источника I освещает отверстие S_0 в непрозрачном экране A . В пределах конуса лучей, дифрагированных на отверстие S_0 , установлен второй экран B с двумя отверстиями S_1 и S_2 .

На экране C в области перекрытия волн, дифрагированных на отверстиях S_1 и S_2 , наблюдаются интерференционные полосы. Если закрыть одно из отверстий, полосы исчезают, экран C оказывается освещенным равномерно. Появление полос нельзя объяснить сложением освещенности, создаваемых на экране каждым из отверстий. Согласно Юнгу и Френелю она вызвана сложением световых волн с учетом их фаз, определяемых расстояниями от отверстия S_1 и S_2 до точек экрана. Пространственная частота полос (число полос на единицу длины) тем больше, чем больше угол, под которым виден отрезок $S_1 S_2$ из точек на плоскости экрана C . Она зависит также от длины волны источника излучения. Поэтому при использовании источника сплошного спектра (лампа накаливания Солнцем), наблюдаемые полосы, за исключением центральной, окрашены, и число, видимое глазом полос, становится невелико (около 10). При сужении спектра источника число полос, обладающих достаточным для наблюдения контрастом, возрастает.

Рис. 2.2. Опыт Юнга по обоснованию волновой природы света

Контраст полос зависит также от размеров отверстий S_0 : при его расширении полосы постепенно исчезают [26].

Юнгам и Френелем были сформулированы и неперменные условия интерференции: полосы образуются только тогда, когда обе волны являются частями одной и той же первичной волны, исходящий из отверстия S_0 . Волновая теория Юнга и Френеля объяснила все многообразие наблюдавшихся интерференционных явлений. Однако природа световых волн осталась неясной вплоть до возведения Максвеллом фундамента электромагнитной теории света.

Опыт Юнга до сих пор остается одним из главных доказательств волновой природы света. Но с позиций корпускулярной теории приема-передачи радиоизлучения опыт Юнга трактуется иначе. Фронт потока радиочастиц излучения от источника I попадает на экран А. Часть частиц проходит через отверстие S_0 беспрепятственно, а часть попадает на кромку этого отверстия и конусообразно рассеивается подобно тому, как распыляются сыпучие материалы на насадках и отверстиях или распылителях. При истечении из отверстия S_0 образуется новый фронт потока частиц, который достигает экрана В и, проходя через отверстия S_1 и S_2 , образует из них еще два фронта, которые, достигая экрана С, создают на его поверхности интерференционную картину из светлых и темных полос Френеля. Следует заметить, что никаких взаимодействий частиц друг с другом не происходит, а интерференционная картина на экране С наблюдается в результате вторичного эмиссионного излучения от взаимодействия радиочастиц с веществом, из которого сделан экран. Это излучение попадает нам на сетчатку глаза, вызывая иллюзию, будто бы мы наблюдаем взаимодействие электромагнитных волн в пространстве.

Такое неопределенное положение относительно природы света сохранялось до начала XIX века, когда были открыты явления дифракции света (огибания светом препятствий) и интерференция света (усиление или ослабление освещенности при наложении световых пучков друг на друга). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. К волновым свойствам света можно отнести также дисперсию света и поляризацию. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Д. Максвелл во второй половине XIX века пытался обосновать, что свет есть частный случай электромагнитных волн. Работами Д. Максвелла были заложены основы электромагнитной теории света. После эксперимен-

тов Г. Герца по обнаружению электромагнитных волн никаких сомнений в том, что при распространении свет ведет себя как волна, не осталось. Тем не менее в начале XX века представления о природе света начали коренным образом меняться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же имеет отношение к действительности. При излучении и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц. Волновыми свойствами света нельзя было объяснить закономерности фотоэффекта.

Возникла необычная ситуация. Явления интерференции, дифракции, поляризации света от обычных источников света неопровержимо свидетельствует о волновых свойствах света. Однако и в этих явлениях при соответствующих условиях свет проявляет корпускулярные свойства. В свою очередь закономерности теплового излучения тел, фотоэлектрического эффекта и других неоспоримо свидетельствуют, что свет ведет себя не как непрерывная, протяженная волна, а как поток «сгустков» (порций, квантов) энергии, то есть как поток частиц – фотонов.

Таким образом, согласно современной физической парадигме свет сочетает в себе непрерывность волн и дискретность частиц. Если учесть, что фотоны существуют только при движении со скоростью света, то напрашивается вывод, что свету одновременно присущи как волновые, так и корпускулярные свойства. Принято считать, что в некоторых явлениях при определенных условиях основную роль играют или волновые, или корпускулярные свойства и свет можно рассматривать или как волну, или как частицы (корпускулы). Одновременное наличие у объектов волновых и корпускулярных свойств получило название корпускулярно-волнового дуализма.

Современная квантовая физика и квантовая электродинамика опираются на три формализма, разработанные независимо друг от друга:

1. Эрвина Шредингера – квантовая механика (волновая функция);
2. Вернера Гейзенберга – квантовые состояния (принцип неопределенности);
3. Поля Дирака, Ричарда Фейнмана – интеграла по траекториям фотона (сложение по стрелкам – амплитудам вероятностей).

Однако во всех этих теориях незыблемым остается корпускулярно-волновой дуализм, якобы свойственный фотону. С одной стороны, фотон демонстрирует свойства волны в явлениях дифракции и интерференции при масштабах, сравнимых с длиной волны фотона, с другой стороны – фотон ведет себя как частица, которая из-

лучается или поглощается целиком объектами, размеры которых много меньше его длины волны (например, атомными ядрами), или вообще могут считаться точечными (к примеру, электрон). На самом деле возможна модель, в которой излучение проявляет только корпускулярные свойства и возбуждает колебательные (волновые) процессы в веществе, на которое падает. Несмотря на успехи волновой теории Максвелла, многие физики считали, что квантование энергии в процессах излучения и поглощения являлось следствием неких свойств вещества, излучающего или поглощающего фотоны (Нильс Бор, Арнольд Зоммерфельд и др.).

М. Планк (1900 г.), объясняя спектр излучения нагретого тела, выдвинул гипотезу, что излучение происходит не сплошным и непрерывным потоком, а отдельными порциями (квантами). Он предположил, что энергия кванта зависит от частоты излучения, которое испускает атом: $\epsilon = h \cdot \nu$ [эрг], где $h = \text{const} \sim 6,62 \cdot 10^{-27}$ [эрг · сек.] – постоянная Планка; ν – частота излучения, Гц.

А. Эйнштейн (1905 г.) нашел применение квантам Планка, объяснив ими взаимодействие света и атомов на поверхности металла (объяснил физику фотоэффекта). Фотоэффект образуется только при определенных и больших значениях $h \cdot \nu$ и не зависит от числа n самих квантов в потоке излучения.

Работы Планка и Эйнштейна вновь напомнили о «забытых» брешах физики: свет – это что? Частицы или волны? [27].

А. Эйнштейн окрестил квант света фотоном. С тех пор свет – это поток фотонов, а фотон – это «своеобразная» частица частоты. Возник очередной «провальчик» в понимании процесса излучения: «как происходит суммирование квантов излучения (наблюдаемой реальности) в непрерывную волну Максвелла (в вымысел)» [27].

Бор, создавая планетарную модель атома, объединяет механику Ньютона, электродинамику Максвелла и кванты Планка.

Замешав вместе реальность и вымысел, Н. Бор, конечно, пришел к противоречиям: «...обращение электронов эквивалентно колебаниям зарядов в диполе Герца и должно сопровождаться излучением...», а излучения не оказалось. Чтобы свести концы с концами пришлось в дальнейшем Н. Бору наделять электрон «особенностями», не совместимыми с механикой материальной точки и электродинамикой Максвелла.

Стало понятно, что механизм излучения атома (реальность) существенно отличается от механизма излучения диполя Герца (вымысел). Излучение по Бору – это последовательность отдельных (по времени) отрезков электромагнитной волны, а излучение по Герцу – это непрерывная (во времени) электромагнитная волна.

Придерживаясь во мнении за электромагнитную волну Максвелла (за вымысел), физики не понимали, как возможно формирование этой «непрерывной» волны отдельными актами излучения при скачкообразных переходах электронов с одной орбиты на другую. Назревало очередное противоречие, так как, с одной стороны, периодический процесс, имеющий начало и конец, должен занимать на оси частот некоторый интервал значений; в то время как с другой стороны эксперимент показывал, что атом излучает на строго фиксированных частотах.

Разрешить его взялся В. Гейзенберг, выдвинув известный «принцип неопределенности», на той основе, что «из неопределенности частоты колебаний (ложная, по делу, посылка) вытекает (как следствие) неопределенность энергии кванта» [27].

Не найдя физической причины означенному выше противоречию, возникшему как результат непонимания структуры фотона и принципов его появления, физики «оправдываются», заявляя: «... фотон адекватно описывается только в рамках современного формализма квантовой теории» [28].

Ответ на вопрос о физической природе РИ, являются ли РИ электромагнитной волной или потоком радиочастиц (корпускул), не может быть убедительным без рассмотрения взаимодействия РИ с веществом (пробным телом).

«Пробное тело – одна из основных концепций классической теории поля, тело, обладающее настолько малым зарядом в случае применительно к электромагнитному полю или настолько малой массой при изучении гравитационного поля, что оно пренебрежимо мало возмущает внешнее поле. Дополнительно предполагается, что размеры пробного тела пренебрежимо малы по сравнению с характерными для конкретной задачи расстояниями, то есть принимаются точечными. При теоретическом рассмотрении полей является абстракцией» [29].

Но электромагнитное поле порождается зарядами, свойственными электронам, а в РИ электроны отсутствуют. Согласно теории электродинамики Максвелла РИ представляют собой специфическую непрерывную среду, распространяющуюся в пространстве со скоростью света. В соответствии с этой теорией РИ, излучаемые одним источником, могут взаимодействовать в вакууме или иной среде с РИ, излучаемыми другими источниками без посредства зарядов и вещества. А результаты этого взаимодействия, такие как интерференция, дифракция, поляризация, могут быть зарегистрированы «пробным телом» или любым чувствительным к этим РИ элементом. Электромагнитное поле неподвижных или равномерно

движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц электромагнитное поле «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитных волн, не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

Но электромагнитное поле создается заряженными телами, потенциал которого убывает пропорционально квадрату расстояния, а РИ в форме потока РЧ распространяются до бесконечности. Следовательно, электродинамика описывает процессы ближнего действия заряженных тел, создающих электромагнитное поле, а процессы радиосвязи осуществляются далеко за пределами зоны их взаимодействия. Значит, радиосвязь на удаленных расстояниях реализуется либо за счет специфической электромагнитной среды Максвелла, либо потока РЧ, уже не связанных с зарядами и создаваемым ими полем. Поэтому процессы радиоизлучения и радиоприема должны рассматриваться отдельно от полей, создаваемых заряженными телами.

Перечислим основные физические законы, описывающие поведение электромагнитного поля и его взаимодействие с заряженными телами в локальной зоне, в которой учитывается его убывание в зависимости от расстояния от этих тел. Перечисляемые законы принципиально не связаны с процессами излучения, экспериментально обоснованы и широко применяются на практике.

- Закон Гаусса для электрического поля, определяющий генерацию электростатического поля зарядами.

- Закон замкнутости силовых линий магнитного поля (соленоидальности магнитного поля); он же – закон Гаусса для магнитного поля.

- Закон индукции Фарадея, определяющий генерацию электрического поля переменным магнитным полем.

- Выражение для силы Лоренца, определяющее силу, действующую на заряд, находящийся в электромагнитном поле.

- Закон Джоуля – Ленца, определяющий величину тепловых потерь в проводящей среде с конечной проводимостью при наличии в ней электрического поля.

- Закон Кулона – в электростатике – закон, определяющий электрическое поле (напряженность и/или потенциал) точечного заряда; также законом Кулона называется и сходная формула, определяющая электростатическое взаимодействие (силу или потенциальную энергию) двух точечных зарядов.

- Закон Био – Савара – Лапласа – в магнитостатике – основной закон, описывающий порождение магнитного поля током (анало-

гичен по своей роли в магнитостатике закону Кулона в электростатике).

– Закон Ампера, определяющий силу, действующую на элементарный ток, помещенный в магнитное поле.

– Закон сохранения заряда – алгебраическая сумма зарядов электрически замкнутой системы сохраняется.

Для физической интерпретации эффектов, свидетельствующих о волновой природе света, была создана теория преобразования РИ на границе двух сред в процессы другой физической природы внутри вещества чувствительных элементов.

Электромагнитная теория света позволила объяснить многие оптические явления, такие как интерференция, дифракция, поляризация и т. д. Однако эта теория не завершила понимание природы света. Уже в начале XX века выяснилось, что она недостаточна для истолкования явлений атомного масштаба, возникающих при взаимодействии света с веществом. Для объяснения таких явлений, как излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона и др. потребовалось введение квантовых представлений. Наука вновь вернулась к идее корпускул – световых квантов, тем более что без пробного тела еще не доказано, что названные эффекты, свидетельствующие о волновой природе света, совершаются в пространстве, а не в веществе непосредственно, с которым РИ взаимодействуют.

Наибольшую простоту и ясный физический смысл РИ принимают при представлении их в форме потока частиц (флюенс) [30].

Флюенс – физическая величина, интеграл по времени от плотности потока частиц или энергии. Иногда используется синонимичный термин «перенос».

Флюенсом частиц в случае пучка частиц называют отношение числа частиц dN , пересекших перпендикулярную пучку элементарную площадку dS за данный промежуток времени, к площади этой площадки. В случае диффузного поля частиц флюенс в точке определяется как отношение числа частиц, проникших в элементарную сферу с центром в этой точке, к площади поперечного сечения этой сферы.

РИ, покинувшие источник излучения, никак не связаны с электромагнитным полем и составляют совокупность материальных тел (РЧ), имеющих постоянную массу, движущихся со скоростью света, плюс скорость источника излучения и являются самостоятельным видом материи.

В середине XX века была создана квантовая электродинамика – одна из наиболее точных физических теорий, служащая фундаментом и образцом для всех современных теоретических построений в физике элементарных частиц.

По нашему мнению, волновые свойства РИ проявляются только в веществе, с которым оно взаимодействует, как в среде более плотной, чем поток РЧ. Полагается, что РЧ – нейтральны, не имеют заряда, обладают постоянной массой. Ввиду малых размеров РЧ, вероятность их столкновений очень мала, поэтому считается, что РЧ между собой не взаимодействуют. Поток РЧ, взаимодействуя с веществом, вызывает в нем колебательные процессы, подобные серийному ударному воздействию множества твердых тел малой массы на тело большой массы. Элементарный процесс взаимодействия РЧ с веществом представляется в виде модели осциллятора (вещество), на который воздействует импульсный сигнал переменной скважности.

Теоретическую основу взаимодействия РЧ с веществом составляет формула $E = h\nu$, связывающая кинетическую энергию E , n РЧ с суммарной массой $m = m_0 n$, с энергией $h\nu$, передаваемой элементу (пикселю) вещества, пропорционально частоте облучения этого пикселя $\nu = n / \tau$, где m_0 – масса одной РЧ; h – коэффициент пропорциональности (постоянная Планка); τ – время, за которое на пиксель падает n РЧ.

Для механической системы, состоящей из одной РЧ, кинетическая энергия равна $E_0 = m_0 c^2 / 2$, тогда $m_0 = 2h / c^2$, где c – скорость света.

Считая, что скорость РЧ относительно источника РИ постоянна и равна скорости света, можно заключить, что масса РЧ постоянна. Однако скорость РЧ относительно приемника может отличаться от скорости света, если относительная скорость источника и приемника отличается от нуля. Это означает, что энергия, передаваемая РЧ пикселю, может быть больше или меньше E_0 .

Физическая модель взаимодействия РИ с веществом соответствует представлению, что в веществе, на которое падает поток РИ, происходят колебательные процессы изменения во времени: температуры, поглощения РЧ, вторичная эмиссия РЧ, выбивание электронов и другие эффекты, подтверждаемые экспериментально.

Простейшей математической интерпретацией процесса взаимодействия РИ с веществом является модель осциллятора (колебательного звена), на который воздействует сигнал в виде последовательности импульсов, аналогичный сигналу временной импульсной модуляции (ВИМ), когда в соответствии с распределением РЧ вдоль направления распространения РИ происходит смещение импульсов по временной оси.

Воздействию отдельной РЧ на вещество на временной оси соответствует импульс. Ширина импульса соответствует времени удар-

ного взаимодействия РЧ с веществом. Амплитуда соответствует мощности взаимодействия, а площадь импульса – кинетической энергии РЧ. Период T определяется расстоянием λ между соседними РЧ, то есть $T = \lambda / c$. На выходе осциллятора в зависимости от физических свойств веществ образуется сигнал в виде напряжения, тока или иных физических процессов, которые можно измерить и получить оценки параметров принимаемого РИ.

Структура потока РИ точечного источника в заданном направлении представляется в виде последовательности РЧ (луча), движущихся друг за другом со скоростью света на расстоянии шага $\lambda = c / \nu$. По терминологии, принятой в волновой теории РИ, λ совпадает с длиной волны. Под фронтом волны понимается геометрическое место точек в форме сферы или плоскости, в которых расположены РЧ. Поток РИ в поперечном направлении представляет собой пучок лучей, плотность которого определяет интенсивность РИ. Поэтому к РИ может быть применено статистическое понятие продольной и поперечной спектральных плотностей распределения частиц вдоль и поперек потока, подчиняющихся статистическим законам распределения. Спектральная плотность распределения частиц определяется свойствами источника РИ и представляет основной интерес при идентификации спектральных параметров и поляризации этого источника.

Лучи в потоке могут быть когерентными, то есть имеют взаимную согласованность расположения РЧ в каждом луче. Важной характеристикой РИ является его поляризация. В электродинамике поляризация частиц – это характеристика состояния частиц, связанная с наличием у них собственного момента количества движения – спина. Понятие спина в обменном взаимодействии тождественных частиц учитывается в квантовой механике и представляет собой чисто квантовый эффект, исчезающий при предельном переходе к классической механике.

Ученым удалось обнаружить частицы со спином 0, 1/2, 1, 3/2 и 2. Чтобы представить наглядно (хоть и упрощенно) спин как свойство объекта, рассмотрим следующий пример.

Пусть у предмета имеется спин, равный 1. Тогда такой объект при повороте на 360 градусов возвратится в исходное положение. На плоскости этим предметом может быть карандаш, который после разворота на 360 градусов окажется в исходном положении. В случае с нулевым спином при любом вращении объекта он будет выглядеть всегда одинаково, к примеру одноцветный мячик.

Для спина 1/2 потребуется предмет, сохраняющий свой вид при развороте на 180 градусов. Им может быть все тот же карандаш,

только симметрично наточенный с обеих сторон. Спин, равный 2, потребует сохранения формы при повороте на 720 градусов, а $3/2 - 540$ [31].

В нашей теории поляризация самой радиочастицы отсутствует из-за ее малых линейных размеров. Она характеризует не частицы, а структуру потока в поперечном сечении и определяет степень его симметрии (или асимметрии) в пространстве. Нами принято, что РИ называется поляризованным, если расположение РЧ в поперечном сечении потока неравномерно и имеется некоторое преимущественное направление, в котором плотность частиц в этом сечении, приходящихся на единицу площади, больше, чем в других направлениях. Такое направление называется направлением поляризации. Очевидно, поляризованные РИ обладают свойством, позволяющим определять спектральную плотность распределения частиц поперек потока в разных направлениях. Это осуществляется в результате взаимодействия РИ с определенным веществом, наделенным таким качеством или техническим устройством, специально предназначенным для определения структуры поперечного сечения РИ.

Воздействие РЧ на вещество (мишень, пробное тело) является ударным, а время взаимодействия много меньше периода последствия РЧ, поэтому для одного луча математическая модель процесса преобразования РИ в радиосигнал представляется в форме прохождения через частотный (полосовой) фильтр импульсной последовательности дельта-импульсов (функция Дирака). Каждой РЧ на временной оси соответствует дельта-импульс с бесконечной мгновенной амплитудой, а энергией, численно равной E_0 . Воздействуя на осциллятор, этот импульс вызывает на его выходе реакцию в виде импульсной переходной характеристики. Для импульсной последовательности ее переходные характеристики складываются со сдвигами во времени, определяемыми интервалами (периодами) следования РЧ в луче. В общем случае интервалы между РЧ в луче распределены по случайному закону в соответствии с некоторой статистической моделью. Сумма импульсных характеристик на выходе осциллятора от одного луча образует полезный радиосигнал, если не считать помех. Каждому лучу соответствует отдельный осциллятор, с выхода которого снимается отдельный радиосигнал, а совокупность радиосигналов образует, условно говоря, «радио-изображение» источника РИ (изображения на многоэлементных полупроводниковых ПЗС-матрицах).

В приборах с зарядовой связью, составляющих основу современной телевизионной техники, используются характеристики «кван-

товая эффективность и квантовый выход ПЗС-матрицы». Квантовый выход – это отношение числа фотоэлектронов, образовавшихся в полупроводнике или вблизи его границы в результате фотоэффекта, к числу упавших на этот полупроводник фотонов. Квантовая эффективность – это квантовый выход светорегистрирующей части приемника, умноженный на коэффициент преобразования заряда фотоэлектрона в зарегистрированный полезный сигнал [6]. ПЗС реагируют на свет с длиной волн от единиц ангстрем (гамма и рентгеновское РИ) до 1100 нм (ИК-РИ). Этот огромный диапазон намного больше спектрального диапазона любого другого детектора, известного к настоящему времени.

Подобные характеристики могут быть введены для оценки эффективности взаимодействия РИ с веществом не только в диапазоне работы ПЗС матриц, но и в радиодиапазоне после замены фотонов на РЧ и соответствующей перенормировки физических величин.

Основной задачей системы приема радиоизлучений (РИ) является определение оценок их характеристик и параметров. Получение таких оценок зависит от выбранных моделей, методов и средств процесса наблюдения РИ. Главными элементами, участвующими в наблюдении, и для которых требуется физическое и математическое описание в явном виде, являются: принимаемый поток РИ (ППР); зеркальная система (ЗС) антенного устройства (радиотелескопа) РТ; система наведения ЗС РТ; чувствительный твердотельный многопиксельный элемент (ЧЭ) приемного устройства, преобразующий ППР в сигнал, по которому определяются требуемые оценки посредством радиоприемника (РП).

ЗС предназначена для фокусировки пучка лучей на плоскость ЧЭ для увеличения их плотности. В идеальной схеме ЗС лучи сходятся в одной точке. Деформации конструкции РТ приводят к расфокусировке, то есть к отклонению длин оптических путей лучей от идеальных. В результате точка фокуса на плоскости ЧЭ смещается и «размывается».

Множество точек пересечения лучей с плоскостью ЧЭ образуют область (пятно), положение и диаметр которого служат оценками эффективности фокусирующих свойств ЗС.

В точках пересечения лучей с плоскостью ЧЭ вещество, из которого он состоит, подвергается импульсному воздействию РЧ с частотой следования импульсов, определяющейся расстояниями между РЧ вдоль луча.

Разность длин оптических путей лучей определяет запаздывание прихода импульсов и проявляется в фазовых смещениях им-

пульсных переходных характеристик, снимаемых с ЧЭ сигналов, и влияет на их результирующие параметры и характеристики.

Предлагаемый подход к расчету оценок влияния деформаций конструкции РТ на параметры и характеристики ППР дает возможность путем измерения этих деформаций исключить или уменьшить их вредное влияние.

На рис. 2.3 приведена математическая модель системы приема-передачи РИ по каналу связи, представляющему условно один луч. Импульсный генератор имитирует РИ последовательности импульсов постоянной амплитуды с заданной несущей частотой. Блок Variable Transport Delay осуществляет время-импульсную модуляцию этих импульсов путем временной задержки информационного полезного сигнала, подаваемого на управляющий вход. Другой блок Variable Transport Delay1 осуществляет задержку импульсов на постоянную величину, пропорциональную разности длин оптических путей лучей, отсчитываемых от фронта потока РИ до точек пересечения лучей этого потока с поверхностью чувствительного элемента приемника. Все лучи имеют одинаковую структуру. Полезные сигналы от каждого луча после своих осцилляторов складываются, образуя суммарный полезный сигнал [28].

Рис. 2.3. Корпускулярная модель приема-передачи радиоизлучений по одному лучу

Изложенный подход к оцениванию влияния смещений элементов зеркальной системы радиотелескопа на характеристики принимаемого РИ был применен для оценок эффективности трехзеркальной системы РТ с диаметром главного зеркала 70 м. Были рассчитаны диаграммы направленности ЗС РТ и диаграммы зависимости ее коэффициентов передачи от смещений контррефлектора и зеркала главного зеркала. Оценки определялись по временным и частотным характеристикам полезного сигнала.

Принятие корпускулярной модели, основой которой являются РЧ, не взаимодействующие между собой, означает отказ от полевой теории света и интерпретации физических эффектов, связанных с ней, без взаимодействия РИ с веществом. Корпускулярно-волновой дуализм был придуман для того, чтобы устранить противоречия, связанные с проявлением светом волновых свойств, которые приписывались свету без его воздействия с веществом. В действительности, все известные эффекты волновых свойств света могут быть объяснены только посредством мишени, пробного тела, эмиссии и др. То есть эксперимент со светом без вещества невозможен. Поэтому правомерна точка зрения и, соответственно, модель, в которой волновые свойства проявляет не РИ, а вещество при взаимодействии с ним. Выражение «фотон на заданной частоте» теряет смысл, а в формуле $E = mc^2 = h\nu$ под m следует понимать суммарную массу РЧ, излучаемых или принимаемых в единицу времени. По существу, фотон представляет собой кортеж РЧ, следующих друг за другом на расстоянии $h = c / \nu$.

Изложенная интерпретация процессов приема-передачи радиоизлучений не нарушает законов сохранения энергии при взаимодействии РЧ с веществом, но упрощает расчеты частотных и временных характеристик радиосигналов. Существенно упрощаются расчеты оценок влияния отклонений (или деформаций) элементов конструкций зеркальных систем антенн на указанные характеристики полезных сигналов, в том числе на диаграммы направленности, спектры, КИП и др.

Следующим шагом для обоснования изложенного подхода является проведение экспериментальных исследований и сопоставление результатов с результатами, полученными на электродинамических моделях.

Против излагаемой теории корпускулярной системы радиопередачи, очевидно, будут возражения физиков, астрофизиков и астрономов в форме ссылок на принятую научным сообществом теорию элементарных частиц: «Стандартную модель – теоретическую конструкцию в физике элементарных частиц, описывающую электро-

магнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает темную материю, темную энергию и не включает в себя гравитацию. Экспериментальное подтверждение существования промежуточных векторных бозонов в середине 80-х годов завершило построение Стандартной модели и ее принятие как основной. Необходимость незначительного расширения модели возникла в 2002 году после обнаружения нейтринных осцилляций, а подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году завершило экспериментальное обнаружение предсказываемых Стандартной моделью элементарных частиц» [32] (рис. 2.4).

В настоящее время считается доказанным, что единое поле, объединяющее все виды взаимодействия, может существовать только при чрезвычайно больших энергиях частиц, недостижимых на современных ускорителях. Такими большими энергиями частицы могли обладать только на самых ранних этапах существования Вселенной, которая возникла в результате так называемого **Большого взрыва** (Big Bang). Космология – наука об эволюции Вселенной – предполагает, что Большой взрыв произошел 18 млрд лет тому назад. В стандартной модели эволюции Вселенной предполагается, что в первый период после взрыва температура могла достигать 10^{32} К, а энергия частиц $E = kT$ достигать значений 10^{19} ГэВ. В этот период материя существовала в форме кварков и нейтрино, при этом все виды взаимодействий были объединены в единое силовое поле. По-

Рис. 2.4. Структурная схема элементарных частиц

степенно по мере расширения Вселенной энергия частиц уменьшалась, и из единого поля взаимодействий сначала выделилось гравитационное взаимодействие (при энергиях частиц $\leq 10^{19}$ ГэВ), а затем сильное взаимодействие отделилось от электрослабого (при энергиях порядка 10^{14} ГэВ). При энергиях порядка 10^3 ГэВ все четыре вида фундаментальных взаимодействий оказались разделенными. Одновременно с этими процессами шло формирование более сложных форм материи – нуклонов, легких ядер, ионов, атомов и т. д. Космология в своей модели пытается проследить эволюцию Вселенной на разных этапах ее развития от Большого взрыва до наших дней, опираясь на законы физики элементарных частиц, а также ядерной и атомной физики [31].

2.1.2. Расчет разности длин оптического пути лучей потока радиоизлучений

Как мы условились ранее, поток радиоизлучения (ПР) будем считать совокупностью отдельных лучей. Из-за больших расстояний от Земли до КИР, приходящий фронт можно считать плоским, монохроматическим; все лучи в таком ПР параллельны друг другу, а интенсивность энергии, переносимой ПР в единицу времени сквозь единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения подчиняется законам флюенса [30]. **Флюенсом частиц** в случае пучка частиц называют отношение числа частиц dN , пересекших перпендикулярную пучку элементарную площадку dS за данный промежуток времени, к площади этой площадки. В случае диффузного поля частиц флюенс в точке определяется как отношение числа частиц, проникших в элементарную сферу с центром в этой точке, к площади поперечного сечения этой сферы $\Phi_N = dN / dS$. $\{\displaystyle \Phi _N=\{\frac {dN}{dS}\}.$

Мощность флюенса частиц (*плотность потока частиц*) определяется как производная по времени от флюенса, накопленного за время t : $P = d\Phi_N / dt$.

С каждой точкой луча связывается своя подвижная система координат, начало которой определяется вектором относительно базовой неподвижной системы координат (БСК) всей системы управления. Ось Z ориентирована в направлении распространения ПР, ось X лежит во фронте ПР параллельно линии горизонта. Система координат XYZ правая.

При попадании лучей на отражающую поверхность считается, что луч полностью, без потерь отражается от границы раздела двух сред. Отраженный луч лежит в плоскости отражения, проходящей через падающий луч и вектор нормали к отражающей поверхности

Рис. 2.5. Базовая система координат

в точке падения. При этом полагается, что соблюдается закон Снеллиуса, согласно которому угол между нормалью и падающим лучом равен углу между нормалью и отраженным лучом. Фронтом отраженного ПР считается геометрическое место точек отраженных лучей с равной длиной оптических путей от произвольно выбранного исходного фронта по каждому отдельному лучу.

В миллиметровом диапазоне при больших размерах отражающих поверхностей ЗС семейства отраженных лучей стягиваются практически в точки или области с малыми линейными размерами.

Основным объектом изучения геометрической оптики является луч. Луч – геометрическая линия, вдоль которой распространяется энергия, переносимая радиоизлучениями. Так как среда однородна, то луч представляет собой прямую линию.

Все системы координат (СК), которые используются при построении модели, определяются поворотом БСК (рис. 2.5) на углы простейших вращений $\beta_i^0, \theta_i^0, \alpha_i^0$ последовательности X-Y-Z и вектором параллельного переноса $\mathbf{r}_i^0$ с координатным столбцом в БСК $\mathbf{r}_i^{0,0} = (x_i^{0,0}, y_i^{0,0}, z_i^{0,0})^T$, где верхний индекс – идентификатор исходной СК, а верхний индекс – идентификатор новой СК, полученной переносом на этот вектор, второй верхний индекс обозначает базис СК, в котором определен координатный столбец.

Переход от СК с индексом i к БСК будет описываться матрицей вращения:

$$\mathbf{c}_i^0(\beta_i^0, \theta_i^0, \alpha_i^0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_i^0) & -\sin(\beta_i^0) \\ 0 & \sin(\beta_i^0) & \cos(\beta_i^0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_i^0) & 0 & \sin(\theta_i^0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_i^0) & 0 & \cos(\theta_i^0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i^0) & -\sin(\alpha_i^0) & 0 \\ \sin(\alpha_i^0) & \cos(\alpha_i^0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Волновой фронт имеет СК, которую будем обозначать ФСК. В ФСК направление распространения лучей фронта параллельно

оси OZ_ϕ и задается направляющим вектором фронта $\mathbf{e}_\phi$ с координатным столбцом $\mathbf{e}_\phi^0 = (0, 0, 1)^T$.

Введем СК падающего луча (ЛСК), полученную переносом ФСК на вектор начала луча $\mathbf{r}_{\text{нл}}^\phi$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_{\text{нл}}^\phi$. Уравнение падающего луча в ФСК задается уравнением:

$$\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},\phi} = \mathbf{r}_{\text{нл}}^{\phi,\phi} + \mu_{\text{пад}} \mathbf{e}_\phi^0,$$

где $\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},\phi}$ – координатный столбец вектора $\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл}}$, задающего положение точки лежащей на падающем луче; $\mu_{\text{пад}}$ – параметр, характеризующий длину луча.

Положение ФСК в БСК определяется вектором $\mathbf{r}_\phi^0$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_\phi^{0,0}$ и матрицей вращения $\mathbf{c}_\phi^0(180^\circ + \beta_\phi^0, 0, \alpha_\phi^0)$ от углов ориентации фронта $\beta_\phi^0, \alpha_\phi^0$. Координатный столбец вектора $\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл}}$ в БСК рассчитывается как $\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},0} = \mathbf{c}_\phi^0 \mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},\phi} + \mathbf{r}_\phi^{0,0}$.

Чтобы определить в пространстве положение ГЗ, необходимо ввести следующие вспомогательные СК, обусловленные конструкцией ЗС: АЗСК – СК азимутальной оси, положение которой в БСК характеризуется матрицей вращения $\mathbf{c}_{\text{аз}}^0(0, 0, \alpha_{\text{аз}}^0)$ от угла азимута $\alpha_{\text{аз}}^0$, УМСК – СК угломестной оси, положение которой в АЗСК характеризуется вектором $\mathbf{r}_{\text{ум}}^{\text{аз}}$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_{\text{ум}}^{\text{аз},\text{аз}}$, ОССК – СК основания, положение которой в УМСК характеризуется матрицей вращения $\mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум}}(\beta_{\text{ос}}^{\text{ум}}, 0, 0)$ от угла места $\beta_{\text{ос}}^{\text{ум}}$, ПСК – СК вершины ГЗ, положение которой в ОССК характеризуется вектором $\mathbf{r}_\Pi^{\text{ос}}$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_\Pi^{\text{ос},\text{ос}}$. Для определения точки падения луча на ГЗ необходимо записать выражение для луча в ПСК:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},\Pi} &= \mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум},\text{T}} \left[\mathbf{c}_{\text{аз}}^0 \mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл},0} - \mathbf{r}_{\text{ум}}^{\text{аз},\text{аз}} \right] - \mathbf{r}_\Pi^{\text{ос},\text{ос}} = \mathbf{r}_{\text{нл}}^{\Pi,\Pi} + \mu_{\text{пад}} \mathbf{e}_\phi^\Pi = \\ &= \mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум},\text{T}} \mathbf{c}_{\text{аз}}^0 \mathbf{c}_\phi^0 \mathbf{r}_{\text{нл}}^{\phi,\phi} + \mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум},\text{T}} \mathbf{c}_{\text{аз}}^0 \mathbf{r}_\phi^{0,0} - \mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум},\text{T}} \mathbf{r}_{\text{ум}}^{\text{аз},\text{аз}} - \mathbf{r}_\Pi^{\text{ос},\text{ос}} + \\ &\quad + \mu_{\text{пад}} \mathbf{c}_{\text{ос}}^{\text{ум},\text{T}} \mathbf{c}_{\text{аз}}^0 \mathbf{c}_\phi^0 \mathbf{e}_\phi^0, \\ \mathbf{r}_{\text{нл}}^{\Pi,\Pi} &= \left[x_{\text{нл}}^{\Pi,\Pi}, y_{\text{нл}}^{\Pi,\Pi}, z_{\text{нл}}^{\Pi,\Pi} \right]^T, \quad \mathbf{e}_\phi^\Pi = \left[x_\phi^\Pi, y_\phi^\Pi, z_\phi^\Pi \right]^T. \end{aligned} \quad (2.1)$$

В ПСК уравнение параболоида имеет наиболее простой вид:

$$(x_\Pi)^2 + (y_\Pi)^2 = 2pz_\Pi, \quad (2.2)$$

где x_Π, y_Π, z_Π – координаты в ПСК точки лежащей на параболоиде (рис. 2.6); p – параметр параболоида.

Параметрическое уравнение параболоида в ПСК будет следующим:

Рис. 2.6. Параметрическое задание параболоида

$$\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi}) = \left[r_{\Pi} \cos \varphi_{\Pi}, r_{\Pi} \sin \varphi_{\Pi}, \frac{(r_{\Pi})^2}{2p} \right]^T = [x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}]^T, \quad (2.3)$$

где $\mathbf{R}_{\Pi}$ – координатный столбец вектора, задающего точку параболоида; r_{Π} – расстояние до проекции точки R_{Π} на плоскость $X_{\Pi}Y_{\Pi}$; φ_{Π} – угол задающий положение точки на параболоиде.

Точка падения $\mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi, \Pi}$ одновременно принадлежит и лучу, и параболоиду, и $\mathbf{R}_{\text{пад}}^{\text{нл}, \Pi} = \mathbf{R}_{\Pi} = \mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi, \Pi}$, поэтому, чтобы найти ее, подставим уравнение (2.1) в (2.2):

$$\begin{aligned} & \left((x_{\text{ф}}^{\Pi})^2 + (y_{\text{ф}}^{\Pi})^2 \right) (\mu_{\text{пад}})^2 + 2(x_{\text{ф}}^{\Pi} x_{\text{нл}}^{\Pi, \Pi} + y_{\text{ф}}^{\Pi} y_{\text{нл}}^{\Pi, \Pi} - 2pz_{\text{ф}}^{\Pi}) \mu_{\text{пад}} + \\ & + (x_{\text{нл}}^{\Pi, \Pi})^2 + (y_{\text{нл}}^{\Pi, \Pi})^2 - 2pz_{\text{нл}}^{\Pi, \Pi} = 0. \end{aligned}$$

Решив полученное уравнение, находим значение параметра $\mu_{\text{пад}}$ и, подставив его в (4.1), находим $\mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi, \Pi}$.

В точке падения введем касательную СК параболоида (КПСК), образованную касательной плоскостью и нормалью к ней, координатные столбцы ортов $\mathbf{e}_{\text{кп}}^x, \mathbf{e}_{\text{кп}}^y, \mathbf{e}_{\text{кп}}^z$ которой в ПСК определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi}) &= \left[r_{\Pi} \cos \varphi_{\Pi}, r_{\Pi} \sin \varphi_{\Pi}, \frac{(r_{\Pi})^2}{2p} \right]^T, \quad \mathbf{e}_{\text{кп}}^{z, \Pi} = (\mathbf{e}_{\text{кп}}^x \times \mathbf{e}_{\text{кп}}^y)^{\Pi}, \\ \mathbf{e}_{\text{кп}}^{x, \Pi} &= \frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{dr_{\Pi}} \bigg/ \left| \frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{dr_{\Pi}} \right|, \quad \mathbf{e}_{\text{кп}}^{y, \Pi} = \frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{d\varphi_{\Pi}} \bigg/ \left| \frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{d\varphi_{\Pi}} \right|, \\ \frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{dr_{\Pi}} &= \left[\cos \varphi_{\Pi}, \sin \varphi_{\Pi}, \frac{r_{\Pi}}{p} \right]^T, \end{aligned}$$

$$\frac{d\mathbf{R}_{\Pi}(r_{\Pi}, \varphi_{\Pi})}{d\varphi_{\Pi}} = [-r_{\Pi} \sin \varphi_{\Pi}, r_{\Pi} \cos \varphi_{\Pi}, 0]^T,$$

где $(\mathbf{e}_{\text{кп}}^x \times \mathbf{e}_{\text{кп}}^y)^{\Pi}$ – координатный столбец векторного произведения ортов $\mathbf{e}_{\text{кп}}^x, \mathbf{e}_{\text{кп}}^y$ в ПСК. Положение КПСК в ПСК определяется вектором $\mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi}$ с координатным столбцом $\mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi, \Pi}$ и матрицей вращения $\mathbf{c}_{\text{кп}}^{\Pi} = [\mathbf{e}_{\text{кп}}^{x, \Pi}, \mathbf{e}_{\text{кп}}^{y, \Pi}, \mathbf{e}_{\text{кп}}^{z, \Pi}]$. Введем СК отражения (ОПСК), координатные столбцы ортов $\mathbf{e}_{\text{оп}}^x, \mathbf{e}_{\text{оп}}^y, \mathbf{e}_{\text{оп}}^z$ которой определяются выражениями:

$$\mathbf{e}_{\text{оп}}^{z, \text{кп}} = [0, 0, 1]^T, \mathbf{e}_{\text{оп}}^{y, \text{кп}} = (\mathbf{e}_{\Phi} \times \mathbf{e}_{\text{оп}}^z)^{\text{кп}}, \mathbf{e}_{\text{оп}}^{x, \text{кп}} = (\mathbf{e}_{\text{оп}}^y \times \mathbf{e}_{\text{оп}}^z)^{\text{кп}}.$$

Положение ОПСК в КПСК определяется матрицей вращения $\mathbf{c}_{\text{оп}}^{\text{кп}} = [\mathbf{e}_{\text{оп}}^{x, \text{кп}}, \mathbf{e}_{\text{оп}}^{y, \text{кп}}, \mathbf{e}_{\text{оп}}^{z, \text{кп}}]$. Угол между $\mathbf{e}_{\text{оп}}^z$ и $-\mathbf{e}_{\Phi}$ определяется как

$$\theta_{\text{оп}} = \arccos(-\mathbf{e}_{\Phi}^{\text{кп}, T} \mathbf{e}_{\text{оп}}^{z, \text{кп}}),$$

где $\mathbf{e}_{\Phi}^{\text{кп}} = \mathbf{c}_{\text{кп}}^{\Pi, T} \mathbf{e}_{\Pi}^{\Phi}$.

Тогда выражение для отраженного луча в ПСК примет вид: $\mathbf{R}_{\text{лп}}^{\text{кп}, \Pi} = \mathbf{R}_{\text{кп}}^{\Pi, \Pi} + \mu_{\text{лп}} \mathbf{e}_{\text{лп}}^{\Pi}$, где $\mu_{\text{лп}}$ – параметр, характеризующий длину отраженного луча.

Чтобы определить в пространстве положение КР, необходимо ввести следующие вспомогательные СК, обусловленные конструкцией ЗС: КРСК – СК привода КР, положение которой в ОССК характеризуется вектором $\mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{ос}}$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{ос}, \text{ос}}$ и матрицей вращения $\mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос}}(\beta_{\text{кр}}^{\text{ос}}, 0, \alpha_{\text{кр}}^{\text{ос}})$ (рис. 2.7) ЭСК – СК эллипсоида, положение которой в КРСК характеризуется вектором $\mathbf{r}_3^{\text{кр}}$ с коор-

Рис. 2.7. Параметрическое задание эллипсоида

динатным столбцом $\mathbf{r}_\varepsilon^{\text{кр,кр}}$. Для определения точки падения луча, отраженного от ГЗ луча на КР необходимо записать выражение для луча в ЭСК:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_{\text{лп}}^{\text{кр,э}} &= \mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос,Т}} \left[\mathbf{R}_{\text{кр}}^{\text{п,п}} + \mu_{\text{лп}} \mathbf{e}_{\text{лп}}^{\text{п}} + \mathbf{r}_{\text{п}}^{\text{ос,ос}} - \mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{ос,ос}} \right] - \mathbf{r}_\varepsilon^{\text{кр,кр}} = \\ &= \mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{э,э}} + \mu_{\text{лп}} \mathbf{e}_{\text{лп}}^{\text{э}} = \mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос,Т}} \mathbf{R}_{\text{кр}}^{\text{п,п}} + \mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос,Т}} \mathbf{r}_{\text{п}}^{\text{ос,ос}} - \mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос,Т}} \mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{ос,ос}} + \mu_{\text{лп}} \mathbf{c}_{\text{кр}}^{\text{ос,Т}} \mathbf{e}_{\text{лп}}^{\text{п}}, \\ \mathbf{r}_{\text{кр}}^{\text{э,э}} &= \begin{bmatrix} x_{\text{кр}}^{\text{э,э}} \\ y_{\text{кр}}^{\text{э,э}} \\ z_{\text{кр}}^{\text{э,э}} \end{bmatrix}^{\text{Т}}, \quad \mathbf{e}_{\text{лп}}^{\text{э}} = \begin{bmatrix} x_{\text{лп}}^{\text{э}} \\ y_{\text{лп}}^{\text{э}} \\ z_{\text{лп}}^{\text{э}} \end{bmatrix}^{\text{Т}}. \quad (2.4)\end{aligned}$$

В ЭСК уравнение параболоида имеет наиболее простой вид:

$$(z_\varepsilon)^2 + \frac{a^2}{b^2}(x_\varepsilon)^2 + \frac{a^2}{b^2}(y_\varepsilon)^2 = a^2, \quad (2.5)$$

где $x_\varepsilon, y_\varepsilon, z_\varepsilon$ – координаты в ЭСК точки, лежащей на эллипсоиде; a, b – параметры эллипсоида.

Параметрическое уравнение эллипсоида в ЭСК будет следующим:

$$\mathbf{R}_\varepsilon(\psi_\varepsilon, \varphi_\varepsilon) = [b \cos \psi_\varepsilon \cos \varphi_\varepsilon, b \cos \psi_\varepsilon \sin \varphi_\varepsilon, a \sin \psi_\varepsilon]^{\text{Т}} = [x_\varepsilon, y_\varepsilon, z_\varepsilon]^{\text{Т}}, \quad (2.6)$$

где $\mathbf{R}_\varepsilon$ – координатный столбец вектора, задающего точку параболоида; $\varphi_\varepsilon, \psi_\varepsilon$ – углы, задающие положение точки на эллипсоиде.

Точка падения $\mathbf{R}_{\text{кр}}^{\text{э,э}}$ одновременно принадлежит и лучу, и эллипсоиду, и $\mathbf{R}_{\text{лп}}^{\text{кр,э}} = \mathbf{R}_\varepsilon = \mathbf{R}_{\text{кр}}^{\text{э,э}}$, поэтому, чтобы найти ее, подставим уравнение (2.4) в (2.5):

$$\begin{aligned}&\left(\frac{a^2}{b^2} (x_{\text{лп}}^{\text{э}})^2 + \frac{a^2}{b^2} (y_{\text{лп}}^{\text{э}})^2 + (z_{\text{лп}}^{\text{э}})^2 \right) (\mu_{\text{лп}})^2 + \\ &+ 2 \left(\frac{a^2}{b^2} x_{\text{лп}}^{\text{э}} x_{\text{пк}}^{\text{э,э}} + \frac{a^2}{b^2} y_{\text{пк}}^{\text{э,э}} y_{\text{лп}}^{\text{э}} + z_{\text{пк}}^{\text{э,э}} z_{\text{лп}}^{\text{э}} \right) \mu_{\text{лп}} + \\ &+ \frac{a^2}{b^2} \left((x_{\text{пк}}^{\text{э,э}})^2 + (y_{\text{пк}}^{\text{э,э}})^2 \right) - a^2 = 0.\end{aligned}$$

Решив полученное уравнение, находим значение параметра $\mu_{\text{лп}}$ и, подставив его в (2.1), находим $\mathbf{R}_{\text{кр}}^{\text{э,э}}$.

В точке падения введем касательную СК эллипсоида (ЭСК), образованную касательной плоскостью и нормалью к ней, координатные столбцы ортов $\mathbf{J}_{\text{дв}}$ которой в ПСК определяются выражениями:

$$\mathbf{R}_\varepsilon(\psi_\varepsilon, \varphi_\varepsilon) = [b \cos \psi_\varepsilon \cos \varphi_\varepsilon, b \cos \psi_\varepsilon \sin \varphi_\varepsilon, a \sin \psi_\varepsilon]^{\text{Т}}, \quad \mathbf{e}_{\text{кр}}^{\text{з,э}} = \left(\mathbf{e}_{\text{кр}}^x \times \mathbf{e}_{\text{кр}}^y \right)^{\text{э}},$$

$$e_{кэ}^{x,э} = \frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\psi_э} \bigg/ \left| \frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\psi_э} \right|, \quad e_{кэ}^{y,э} = \frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\varphi_э} \bigg/ \left| \frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\varphi_э} \right|,$$

$$\frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\varphi_э} = [-b \cos \psi_э \sin \varphi_э, b \cos \psi_э \cos \varphi_э, 0]^T,$$

$$\frac{d\mathbf{R}_э(\psi_э, \varphi_э)}{d\psi_э} = [-b \sin \psi_э \cos \varphi_э, -b \sin \psi_э \sin \varphi_э, a \cos \psi_э]^T,$$

где $(\mathbf{e}_{кэ}^x \times \mathbf{e}_{кэ}^y)^\vartheta$ – координатный столбец векторного произведения ортов $\mathbf{e}_{кэ}^x, \mathbf{e}_{кэ}^y$ в ЭСК. Положение КЭСК в ЭСК определяется вектором $\mathbf{R}_{кэ}^\vartheta$ с координатным столбцом $\mathbf{R}_{кэ}^{\vartheta, \vartheta}$ и матрицей вращения $\mathbf{c}_{кэ}^\vartheta = [\mathbf{e}_{кэ}^{x, \vartheta}, \mathbf{e}_{кэ}^{y, \vartheta}, \mathbf{e}_{кэ}^{z, \vartheta}]$. Введем СК отражения (ОЭСК), координатные столбцы ортов $\mathbf{e}_{оэ}^x, \mathbf{e}_{оэ}^y, \mathbf{e}_{оэ}^z$ которой определяются выражениями:

$$\mathbf{e}_{оэ}^{z, кэ} = [0, 0, 1]^T, \quad \mathbf{e}_{оэ}^{y, кэ} = (\mathbf{e}_{лп} \times \mathbf{e}_{оэ}^z)^{кэ}, \quad \mathbf{e}_{оэ}^{x, кэ} = (\mathbf{e}_{оэ}^y \times \mathbf{e}_{оэ}^z)^{кэ}.$$

Положение ОЭСК в КЭСК определяется матрицей вращения $\mathbf{c}_{оэ}^{кэ} = [\mathbf{e}_{оэ}^{x, кэ}, \mathbf{e}_{оэ}^{y, кэ}, \mathbf{e}_{оэ}^{z, кэ}]$. Угол между $\mathbf{e}_{оэ}^z$ и $-\mathbf{e}_{лп}$ определяется как $\vartheta_{оэ} = \arccos(-\mathbf{e}_{лп}^T \mathbf{e}_{оэ}^z)$, где $\mathbf{e}_{лп}^{кэ} = \mathbf{c}_{кэ}^\vartheta \mathbf{e}_{лп}^\vartheta$.

Тогда выражение для отраженного луча в ЭСК примет вид: $\mathbf{R}_{лэ}^{кэ, \vartheta} = \mathbf{R}_{кэ}^{\vartheta, \vartheta} + \mu_{лэ} \mathbf{e}_{лэ}^\vartheta$, где $\mu_{лэ}$ – параметр, характеризующий длину отраженного луча.

Чтобы найти координаты точек пересечения лучей с плоскостью облучателя, введем СК облучателя (ОБСК), положение которой относительно ОССК определяется вектором $\mathbf{r}_{об}^{oc}$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_{об}^{oc, oc}$ и матрицей вращения $\mathbf{c}_{об}^{oc}(\beta_{об}^{oc}, 0, \alpha_{об}^{oc})$.

Плоскость облучателя в ОБСК задается в параметрическом виде следующим образом:

$$\mathbf{R}_{об} = u \mathbf{e}_{об}^{x, об} + v \mathbf{e}_{об}^{y, об}, \quad \mathbf{e}_{об}^{x, об} = [1, 0, 0]^T, \quad \mathbf{e}_{об}^{y, об} = [0, 0, 1]^T,$$

где u, v – линейные размеры облучателя.

Для определения точки падения луча, отраженного от КР луча на облучатель, необходимо записать выражение для луча в ОБСК:

$$\mathbf{R}_{лэ}^{кэ, об} = \mathbf{c}_{об}^{oc, T} \left[\mathbf{c}_{кр}^{oc} \left[\mathbf{R}_{кэ}^{\vartheta, \vartheta} + \mu_{лэ} \mathbf{e}_{лэ}^\vartheta + \mathbf{r}_э^{кр, кр} \right] + \mathbf{r}_{кр}^{oc, oc} - \mathbf{r}_{об}^{oc, oc} \right] =$$

$$-\mathbf{r}_{кэ}^{об, об} + \mu_{лэ} \mathbf{e}_{лэ}^\vartheta = \mathbf{c}_{об}^{oc, T} \mathbf{c}_{кр}^{oc} \mathbf{R}_{кэ}^{\vartheta, \vartheta} + \mathbf{c}_{об}^{oc, T} \mathbf{c}_{кр}^{oc} \mathbf{r}_э^{кр, кр} + \mathbf{c}_{об}^{oc, T} \mathbf{r}_{кр}^{oc, oc} -$$

$$-\mathbf{c}_{об}^{oc, T} \mathbf{r}_{об}^{oc, oc} + \mu_{лэ} \mathbf{c}_{об}^{oc, T} \mathbf{e}_{лэ}^\vartheta,$$

$$\mathbf{r}_{кэ}^{об, об} = \begin{bmatrix} x_{кэ}^{об, об} \\ y_{кэ}^{об, об} \\ z_{кэ}^{об, об} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{e}_{лэ}^\vartheta = \begin{bmatrix} x_{лп}^{об} \\ y_{лп}^{об} \\ z_{лп}^{об} \end{bmatrix}^T.$$

Точка падения $\mathbf{R}_{\text{ко}}^{\text{об,об}}$ одновременно принадлежит и лучу и плоскости:

$$\mathbf{r}_{\text{кэ}}^{\text{об,об}} + \mu_{\text{лэ}} \mathbf{e}_{\text{лэ}}^{\text{об}} = \mathbf{R}_{\text{ко}}^{\text{об,об}} = u \mathbf{e}_{\text{об}}^{x,\text{об}} + v \mathbf{e}_{\text{об}}^{y,\text{об}},$$

Решив полученное уравнение, находим значение параметра $\mu_{\text{лэ}}$ и, подставив его в уравнение плоскости, находим $\mathbf{R}_{\text{ко}}^{\text{об,об}}$.

Понятие плоскости облучателя является условным. В дальнейшем полагается, что в этой плоскости помещается многопиксельная матрица радиоприемника.

Далее задача заключается в том, чтобы разработать модель процесса взаимодействия радиоизлучения с веществом чувствительно-го элемента (пикселя).

Допустим, на вход некоторой линейной системы L подается входной сигнал $x(n)$. При этом на выходе этой системы наблюдается сигнал $y(n)$. Спрашивается, как смоделировать работу «черного ящика» L , зная входной и наблюдая выходной сигналы? Так как имеется возможность выбирать любые входные сигналы, то подадим на вход дельта-импульс:

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & \text{при } n = 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

На выходе получим некоторую последовательность $h(n)$, которая называется откликом на единичное входное воздействие или импульсным откликом. В силу линейности системы изменение масштаба дельта-импульса приведет к аналогичному изменению выходной последовательности $h(n)$, то есть $L[a\delta(n)] = ah(n)$. При этом любые дискретные сигналы можно рассматривать как последовательности дельта-импульсов с разными масштабами: $x(n)\delta(-n)$. Подадим на вход линейной системы последовательность дельта-импульсов: $x(n) = \delta(-n)$. Каждый входной отсчет сигнала $x(n)$ будет генерировать смещенную последовательность $h(n-m)$ (рис. 2.8).

Рис. 2.8. Формирование выходного сигнала в линейных системах с постоянными параметрами

Следовательно, при произвольном входном сигнале линейной системы с постоянными параметрами, выходной будет определяться выражением

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k). \quad (2.7)$$

Таким образом, работа линейной системы полностью определяется импульсным откликом $h(n)$ этой системы.

Рассмотрим реакцию линейной системы на входное воздействие $x(n) = e^{j\omega n}$, которое описывает комплексную синусоиду с частотой ω . После подстановки в выражение (2.7) данного выражения получим:

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j\omega k} h(n-k) \Big|_{i=n-k} = \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} e^{j\omega(n-i)} h(i) = e^{j\omega n} \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i) e^{-j\omega i} = e^{j\omega n} H(\omega), \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $H(\omega)$ – частотная характеристика системы. Таким образом, пропуская комплексную синусоиду через линейную системы, получаем ту же самую синусоиду, но с измененными амплитудой и фазой $H(\omega)$. Представление частотной характеристики на комплексной плоскости показано на рис. 2.9.

Из рис. 2.9 видно, что частотную характеристику можно записать в следующем виде:

$$H(\omega) = r(\omega)e^{j\phi},$$

где ϕ – начальная фаза; $r(\omega) = \sqrt{(\text{Im}(H(\omega)) + \text{Re}(H(\omega)))^2} = |H(\omega)|$. Начальную фазу можно выразить через отношения мнимой и действительной частей частотной характеристики:

$$\phi = \arctg \frac{\text{Im}(H(\omega))}{\text{Re}(H(\omega))}.$$

Так как частотная характеристика $H(\omega)$ связана с импульсным откликом $h(n)$ через преобразование Фурье, то

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\omega) e^{j\omega n} d\omega. \quad (2.9)$$

Рис. 2.9. Представление частотной характеристики на комплексной плоскости

Если $|H(\omega)| = 1$, то комплексные синусоиды данной частоты проходят через линейную систему без искажений. Соответственно, если $|H(\omega)| = 0$, то комплексные синусоиды данной частоты не пропускаются. Используя это свойство частотной характеристики можно выполнять фильтрацию сигналов. Например, при идеальной низкочастотной фильтрации можно положить

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \omega < \pi, \\ 0, & \pi \leq \omega < 2\pi. \end{cases}$$

Из выражения (2.9) импульсная характеристика такого фильтра $h(n) = \sin c(n)$ определена на интервале $(-\infty; +\infty)$. Поэтому в общем случае реализовать на практике идеальный фильтр низких частот невозможно. Аналогичное выражение импульсной характеристики можно получить для фильтра высоких частот, который также является нереализуемым.

Вычисление свертки (2.7) можно выполнить в частотной области. Известно, что сигнал $x(n)$ связан со своим образом в частотной области преобразованием Фурье:

$$X(\omega) = \sum_n x(n)e^{-j\omega n}, \quad x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega)e^{j\omega n} d\omega.$$

При этом если на вход линейной системы подать последовательность $X(\omega)e^{j\omega n}$, то получим отклик $e^{j\omega n} X(\omega)H(\omega)$. С помощью обратного преобразования Фурье получаем:

$$y(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega)H(\omega)e^{j\omega n} d\omega,$$

или в частотной области

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega). \quad (2.10)$$

Таким образом, свертка в частотной области представляет собой умножение сигнала $X(\omega)$ на частотную характеристику фильтра $H(\omega)$.

При приеме радиосигналов (РС) от удаленных космических источников радиоизлучений (КИР) посредством зеркальных систем (ЗС) радиотелескопов (РТ) и радиоприемных устройств (РПУ) существует задача идентификации передаточной функции ЗС в цепи преобразования КИР-ЗС-РПУ-РС. Для решения этой задачи требуются физическая и математическая модели этой цепи приема-передачи. С другой стороны, ЗС является составной частью системы на-

ведения (СН) РТ, поэтому задачу можно сформулировать иначе: как СН РТ влияет на процесс приема-передачи радиоизлучений (РИ)? Модель РИ рассматривается в форме потоков нейтральных (незаряженных) радиочастиц (РЧ). Поток РЧ, взаимодействуя с веществом чувствительного элемента (ЧЭ) радиоприемника, вызывает в нем колебательные процессы, подобные серийному ударному воздействию множества твердых тел малой массы на тело большой массы. Элементарный процесс взаимодействия РЧ с веществом представляется в виде модели колебательного контура (рис. 2.10) (вещество), на который воздействует импульсный сигнал переменной скважности [7].

ЗС предназначена для фокусировки пучка лучей на плоскость ЧЭ для увеличения их плотности. В идеальной схеме ЗС лучи сходятся в одной точке. Деформации конструкции РТ приводят к расфокусировке, то есть к отклонению длин оптических путей лучей от идеальных. Множество точек пересечения лучей с плоскостью ЧЭ образуют область (пятно), положение и диаметр которого служат оценками эффективности фокусирующих свойств ЗС. В точках пересечения лучей с плоскостью ЧЭ вещество, из которого он состоит, подвергается импульсному воздействию РЧ с частотой следования импульсов, определяющейся расстояниями между РЧ вдоль луча. Разность длин оптических путей лучей определяет запаздывание прихода импульсов и проявляется в фазовых смещениях импульс-

Рис. 2.10. Математическая модель пикселя матричного приемника радиоизлучений

На рис. 2.11: 1 – вершина зеркала; 2 – точка пересечения вертикально падающего луча 3–2 с параболической поверхностью; 3 – точка на условной мгновенной плоскости фронта потока радиоизлучения (ПФПР) точечного удаленного источника излучения; 4 – фокус 1 зеркала, в который сходятся все отраженные от поверхности параболоида лучи (например, 2–4, 12–4, 1–4), от вертикально падающих лучей (3–2, 11–12, 5–1) от одного удаленного космического источника радиоизлучения (КИР); 5 – точка пересечения нормали 2–5 с поверхностью параболоида в точке 2; 6 – фокус 2 зеркала, в который сходятся все отраженные от поверхности параболоида

лучи (например, 2–6, 12–6, 1–6), от наклонно под углом α падающих лучей (5–2, 13–12, 10–1); 7 – точка пересечения нормали 2–5 с горизонтальной плоскостью, проходящей через вершину параболоида (точка 1); 8 – точка пересечения отраженного луча 2–4 с горизонтальной плоскостью, проходящей через вершину параболоида (точка 1); 9 – точка пересечения фокальной оси 1–4 с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку 2; 10 – точка на ПФПР, наклоненной от горизонтального положения на угол $\angle 11-5-13=\alpha$; 11 – точка на ПФПР вертикально падающего луча 11–12; 12 – точка на ПФПР, наклоненной от горизонтального положения на угол $\angle 11-5-13=\alpha$, луча 10–1, проходящего через вершину параболоида; 13 – точка на ПФПР, наклоненной от горизонтального положения на угол $\angle 11-5-13=\alpha$, луча 13–12.

В плоскости 4–6, проходящий через фокус 1, обычно помещается матрица чувствительного элемента радиоприемника. В мм диапазоне РИ и малых углах отклонения фокальной оси от направления на КИР лучи от фронтальной плоскости 13–5 сходятся практически в одной точке – фокусе 2. Но оптические пути их от этой плоскости будут разными, то есть они в фокус 2 придут в разное время, с запаздыванием. Разность длин оптических путей лучей образует фазовое запаздывание ударного взаимодействия корпускул с чувствительным веществом матрицы. Суммарное взаимодействие всех частиц из плоскости апертуры зеркала за один период колебаний осциллятора, в котором они эти колебания возбуждают, будет зависеть от разности длин оптических путей. И при значительных их величинах колебания на выходе осциллятора могут приходить в противофазе, обнуляя выходной сигнал.

Зависимость мощности радиосигнала на выходе осциллятора входного фильтра радиоприемника за один период колебаний от величины рассогласования между угловым направлением на КИР и направлением фокальной оси зеркала называется диаграммой направленности.

2.1.3. Диаграмма направленности приемной антенны радиотелескопа (ДНА РТ)

ДНА является важнейшей характеристикой зеркальной системы ЗС РТ, численно определяющей ее направленные свойства. В корпускулярной модели радиоизлучения все лучи потока радиоизлучения параллельны вектору целеуказания, а радиочастицы (РЧ) во фронтальной плоскости потока когерентны. Это означает, что в идеальном случае при симметричной схеме ЗС, когда геометрическое положение ЗС соответствует теоретическому положению

нию, а вектор фокальной оси коллинеарен вектору целеуказания, все частицы из фронтальной плоскости потока, пройдя путь переотражений в ЗС, попадут на многопиксельной матрице приемника в одну точку фокус (один пиксель), образуя на входе в осциллятор один импульс, амплитуда которого пропорциональна числу лучей в потоке. Период чередования импульсов обратно пропорционален несущей частоте излучения. При угловом рассогласовании векторов целеуказания и фокальной оси, пути РЧ вдоль соответствующих лучей будут различны, то есть оптические пути лучей будут отличаться. Приход каждой РЧ на пиксель матрицы приемника равносильно импульсному воздействию на осциллятор, с выхода которого снимается сигнал в форме импульсной переходной характеристики. Модель импульса принимается в виде дельта функции, а модель осциллятора чувствительного элемента пикселя – в виде колебательного контура, настроенного на несущую частоту радиоизлучения. Сумма всех импульсных характеристик от РЧ, принадлежащих одной из плоскостей фронта излучения, образует комплексный сигнал в форме их суммы со сдвинутыми фазами. В упрощенном варианте – это сумма синусов, сдвинутых по времени на величину запаздывания, которая зависит от разности длин оптических путей РЧ, а они в свою очередь – от рассогласования векторов целеуказания и фокальной оси. Найдем выражение для суммы синусов на выходе осциллятора для оценки мощности принимаемого сигнала как функции отклонения фокальной оси от направления на источник радиоизлучения [33].

Для нахождения сумм вида:

$$S_1 = \cos \varphi + \cos(\varphi + \alpha) + \dots + \cos(\varphi + n\alpha) = \sum_{k=0}^n \cos(\varphi + k\alpha), \quad (2.11)$$

$$S_2 = \sin \varphi + \sin(\varphi + \alpha) + \dots + \sin(\varphi + n\alpha) = \sum_{k=0}^n \sin(\varphi + k\alpha) \quad (2.12)$$

рассмотрим выражение

$$S = S_1 + S_2 \quad (2.13)$$

и преобразуем его, используя формулу Эйлера:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi.$$

$$S = \sum_{k=0}^n (\cos(\varphi + k\alpha) + i \sin(\varphi + k\alpha)) = \sum_{k=0}^n e^{i(\varphi + k\alpha)}. \quad (2.14)$$

Правая часть последнего равенства представляет собой геометрическую прогрессию со знаменателем $e^{i\alpha}$. Сумма членов такой прогрессии равна

$$S = \frac{e^{i\varphi}(e^{i(n+1)\alpha} - 1)}{e^{i\alpha} - 1}. \quad (2.15)$$

Умножим числитель и знаменатель дроби в правой части равенства (2.15) на $(-ie^{i\alpha/2})$. Тогда знаменатель этой дроби становится вещественным и принимает вид:

$$-i(e^{i\alpha/2} - e^{-i\alpha/2}) = 2\sin\frac{\alpha}{2}.$$

Затем преобразуем числитель полученной дроби, используя формулу Эйлера:

$$\begin{aligned} -ie^{i\alpha/2}e^{i\varphi}(e^{i(n+1)\alpha} - 1) &= -i(e^{i(\varphi+(n+\frac{1}{2})\alpha)} + e^{i(\varphi-\alpha/2)}) = \\ &= -i\cos(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha) - i\cos(\varphi - \frac{\alpha}{2}) + \\ &+ \sin(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha) - \sin(\varphi - \frac{\alpha}{2}). \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$S_1 = \operatorname{Re} S, S_2 = \operatorname{Im} S,$$

получим:

$$S_1 = \frac{\sin(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha) - \sin(\varphi - \frac{\alpha}{2})}{2\sin\frac{\alpha}{2}}, \quad (2.16)$$

$$S_2 = \frac{\cos(\varphi - \frac{\alpha}{2}) - \cos(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha)}{2\sin\frac{\alpha}{2}}. \quad (2.17)$$

Используя тригонометрические тождества

$$\begin{aligned} \sin\alpha - \sin\beta &= 2\sin\frac{\alpha - \beta}{2}\cos\frac{\alpha + \beta}{2}, \\ \cos\alpha - \cos\beta &= 2\sin\frac{\alpha - \beta}{2}\sin\frac{\alpha + \beta}{2}, \end{aligned}$$

преобразуем разности синусов и косинусов в формулах (2.16) и (2.17):

$$\begin{aligned}\sin(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha) - \sin(\varphi - \frac{\alpha}{2}) &= 2\sin\frac{(n+1)\alpha}{2}\cos(\varphi + \frac{n\alpha}{2}), \\ \cos(\varphi - \frac{\alpha}{2}) - \cos(\varphi + (n + \frac{1}{2})\alpha) &= 2\sin\frac{(n+1)\alpha}{2}\cos(\varphi + \frac{n\alpha}{2}).\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}S_1 &= \sum_{k=0}^n \cos(\varphi + k\alpha) = \frac{\sin\frac{(n+1)\alpha}{2}\cos(\varphi + \frac{n\alpha}{2})}{\sin\frac{\alpha}{2}}, \\ S_2 &= \sum_{k=0}^n \sin(\varphi + k\alpha) = \frac{\sin\frac{(n+1)\alpha}{2}\sin(\varphi + \frac{n\alpha}{2})}{\sin\frac{\alpha}{2}}.\end{aligned}$$

Средняя мощность на промежутке длиной T подсчитывается по формуле

$$P(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t)]^2 dt.$$

Если мощность рассматривается как функция времени, то ее называют временной мощностью или просто мощностью. Мощность может быть представлена также как функция частоты. В этом случае она называется частотной мощностью или спектральной мощностью. Спектральную мощность называют часто спектральной плотностью или спектром. Названия «временная мощность» и «частотная мощность», хотя, к сожалению, и используются редко, но более правильно отражают соотношение между временным и частотным представлениями сигнала по сравнению с распространенными названиями «мощность» (в случае временного представления) и «спектральная плотность» (в случае частотного представления).

В нашем случае ДНА характеризуется временной мощностью. Промежуток времени $T = 1/f_0$ определяется несущей частотой радиоизлучения f_0 . Это время между двумя последовательными фронтами потока радиоизлучения.

Сигнал S_2 является функцией 3 аргументов:

n – число РЧ во фронтальной плоскости потока излучения, падающих на поверхность главного зеркала;

$n\alpha$ – фаза максимального сдвига по времени импульсных характеристик осциллятора для заданного угла отклонения фокальной оси от направления на источник радиоизлучения;

$\varphi = 2\pi f_0 t$ – текущий угол синусоидальной составляющей импульсной характеристики осциллятора.

Из трех аргументов только один зависит от времени – $\varphi(t)$, поэтому средняя мощность сигнала s_2 на промежутке длиной T определяется выражением:

$$P(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [S_2(t)]^2 dt. \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} P(t_0, T) &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\frac{\sin((\frac{n+1}{2})\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \right)^2 (\sin(\varphi + n\alpha/2))^2 dt = \\ &= \left(\frac{\sin((\frac{n+1}{2})\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \right)^2 \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\sin(\varphi + n\alpha/2))^2 dt = \left(\frac{\sin((\frac{n+1}{2})\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \right)^2 K, \end{aligned}$$

где

$$K = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\sin(\varphi + n\alpha/2))^2 dt, \quad (2.19)$$

где K является постоянным нормирующим множителем.

ДНА как функция от рассогласования векторов целеуказания и фокальной оси определяется выражением ДНА:

$$DNA = \left(\frac{\sin((\frac{n+1}{2})\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \right)^2. \quad (2.20)$$

Рис. 2.12 демонстрирует, как меняется форма ДНА в зависимости от параметров зеркальной системы и частоты РИ.

Оценка фазовой зависимости сигнала на выходе осциллятора от разности оптических путей лучей приближенно может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_i &= E_i \cdot \sin \left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (L_i - L_{\min}) + \varphi_i \right), \\ \Psi_i &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (L_i - L_{\min}) + \varphi_i, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где Ψ_i – фаза, L_i – длина оптического пути i -го луча РИ; $L_{\min}$ – минимальная длина оптического пути из всех лучей.

Расчетная схема вычисления длины оптического пути луча (радиочастицы) от плоскости фронта потока радиоизлучения в 3-зер-

Рис. 2.12. ДНА как функция
от рассогласования векторов целеуказания и фокальной оси

кальной системе радиотелескопа РТ-70, построенной по схеме Несмита, изображена на рис. 2.13:

- главное зеркало – параболоид вращения;
- контррефлектор – эллипсоид вращения;
- перескопическое зеркало – плоскость;
- приемная матрица – плоскость.

Схема и формула (2.21) определяют простой алгоритм численного расчета влияния смещений элементов ЗС на характеристики суммарного выходного сигнала приемника, несущего полезную информацию о КИР. Для этого фронтальная плоскость потока излучения в апертуре главного зеркала разбивается на заданное число лучей, и для каждого луча методами геометрической оптики рассчитывается оптический путь РЧ. Путь пересчитывается в фазу, фазы складываются, и в конечном итоге определяется величина изменения амплитуды суммарного радиосигнала от факторов отклонения элементов ЗС от их теоретического положения или отклонения от

Рис. 2.13. Оптический путь радиочастицы
в 3-зеркальной системе радиотелескопа РТ-70

направления на КИР (многолепестковая диаграмма направленности при оценке мощности сигнала). Если точки пересечения лучей не фокусируются в один пиксель на приемной матрице, то из всех длин оптических путей частиц выбирается оптический путь наименьшей длины, а точка пересечения этого луча принимается за фазовый центр. Разность оптических путей учитывается при расчете суммарной мощности принимаемого излучения. Точность наведения ЗС РТ обеспечивается системой управления, которая включает в себя систему измерения вектора состояния элементов конструкции РТ относительно выбранной системы координат и компенсацию ошибок наведения [8].

На рис. 2.14 показана относительная интенсивность максимума в фазовом центре вторичного фокуса ЗС при зонтичных деформациях, поперечных смещениях КР.

Распределение интенсивности в плоскости облучателя может быть аппроксимировано выражением

$$I(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}, x, y) = \frac{A(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}, x, y) \sin^2(\delta(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}) \rho(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}, x, y))}{(\delta(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}) \rho(\mathbf{e}_{\text{зс}}, \mathbf{q}_{\text{об}}, x, y))^2}, \quad (2.22)$$

Рис. 2.14. Относительная интенсивность максимума в фазовом центре вторичного фокуса ЗС при зонтичных деформациях ГЗ, поперечных и продольных смещениях КР

где:

$\mathbf{e}_{\text{ЗС}} = (\Delta\alpha_{\text{тз}}, \Delta\beta_{\text{тз}}, \Delta x_{\text{кр}}, \Delta y_{\text{кр}}, \Delta z_{\text{кр}}, \Delta\beta_{\text{кр}}, \Delta\theta_{\text{кр}})^T$ – ошибки наведения элементов ЗС;

$\Delta\alpha_{\text{тз}}, \Delta\beta_{\text{тз}}$ – ошибки наведения фокальной оси (ФО) ГЗ;

$\Delta x_{\text{кр}}, \Delta y_{\text{кр}}, \Delta z_{\text{кр}}$ – линейные рассогласования фокусов КР и ГЗ;

$\Delta\beta_{\text{кр}}, \Delta\theta_{\text{кр}}$ – угловые рассогласования между ФО ГЗ и ФО КР;

x, y – координаты, задающие точку в плоскости облучателя;

$\mathbf{q}_{\text{об}} = (\Delta x_{\text{об}}, \Delta y_{\text{об}}, \Delta z_{\text{об}}, \Delta\beta_{\text{об}}, \Delta\theta_{\text{об}})^T$ – линейные и угловые отклонения облучателя от юстировочного положения;

$$\begin{aligned} \rho^2 = & (x + \Delta x_{\text{об}} + \delta_1 \Delta\alpha_{\text{тз}} + \delta_2 \Delta\beta_{\text{кр}} + \delta_3 \Delta x_{\text{кр}} + \delta_4 \Delta z_{\text{кр}}, \Delta\theta_{\text{кр}})^2 + \\ & + y(y + \Delta y_{\text{об}} + \delta_1 \Delta\beta_{\text{тз}} + \delta_2 \Delta\theta_{\text{кр}} + \delta_3 \Delta y_{\text{кр}} + \delta_4 \Delta z_{\text{кр}} \Delta\beta_{\text{кр}})^2; \end{aligned}$$

$$\delta = \delta_5 - \delta_6 (\Delta z_{\text{об}} + \delta_7 \Delta z_{\text{кр}} + \delta_8 \Delta\beta_{\text{об}} + \delta_8 \Delta\beta_{\text{кр}} + \delta_9 \Delta\beta_{\text{кр}} \Delta y_{\text{кр}} + \delta_9 \Delta\theta_{\text{кр}} \Delta x_{\text{кр}})^2;$$

$$\begin{aligned} A = & \delta_{10} - \delta_{11} (\Delta y_{\text{кр}} (x - \Delta x_{\text{об}}) + \delta_{12} \Delta x_{\text{кр}} (y - \Delta y_{\text{об}}) + \delta_{13} \Delta x_{\text{кр}} (x - \Delta x_{\text{об}}) + \\ & + \delta_{14} \Delta y_{\text{кр}} (y - \Delta y_{\text{об}}) + \delta_{15} \Delta z_{\text{об}})^2; \end{aligned}$$

где δ_i – весовые коэффициенты, определяемые при моделировании и верифицируемые методами радиоголографии.

Результаты исследований показали, что радиотелескоп мм диапазона по аналогии с фотооптическими приборами можно рассматривать как устройство для получения изображений удаленных точечных и протяженных КИР. В плоскости облучателя, на которую посредством ЗС проецируется наблюдаемый объект, последний характеризуется распределением интенсивности принимаемого радиоизлучения. Для РТ–70 на длине волны 1 мм была рассчитана ширина ДНА для точечного приемника по уровню половинной мощности (3 угл. сек.).

При отсутствии деформаций конструкции радиоизображение точечного КИР при изменении его углового положения будет перемещаться по приемной матрице в виде «пятна», охватывающего один или несколько пикселей. Размеры этого пятна изменяются к периферии незначительно. При длине волны 1 мм и угловой ошибке 1 угл. сек. линейное перемещение пятна составляет 2,24 мм. При размере апертуры приемной матрицы 50 мм поле зрения шибки будет составлять около 25 угл. сек.

Одним из основных режимов работы РТ по КИР является накопление сигнала при длительной экспозиции (до нескольких часов). Моделирование показало, что в этом случае применение одиночного приемника с площадью апертуры большей, чем ширина ДНА, в приемник могут попасть излучения от нескольких источников, что затруднит их идентификацию. С другой стороны, уменьшение площади апертуры облучателя приведет к чрезвычайно жестким требованиям к точности наведения ГЗ, что является проблематичным при создании следящих приводов и измерительной системы. Применение матричных приемников (МПР), представляющих собой пакет облучателей, упакованных в матрицу, подобную ПЗС, применяемой в оптике, является эффективным способом компенсации влияния деформаций конструкции РТ и позволяет существенно снизить требования к точности наведения ГЗ, одновременно увеличив разрешающую способность за счет одновременного приема сигнала несколькими пикселями приемной матрицы. Для МПР возможно обеспечить реконструкцию радиосигнала от точечного КИР с помощью последовательной записи кадров сигнала с МПР и использовании информации о вероятном положении изображения КИР на МПР, получаемой с помощью модели оценки влияния ошибок наведения и деформаций конструкции на ДНА.

Для расширения зоны видимости КИР требуются либо многолепестковая ДНА, либо сканирование ДНА относительно линии выбранного направления на КИР. Ниже даются описание системы конического сканирования ДНА посредством главных приводов наведения зекальной системы РТ-70.

2.2. Модели зеркальных систем

2.2.1. Анализ радиотелескопов с регулируемой поверхностью главного зеркала

Рассмотрим четыре радиотелескопа с регулируемой поверхностью главного зеркала (ГЗ).

Телескоп Грин-Бэнк (рис. 2.15)

Активная регулировка поверхности ГВТ в основном направлена на структурные деформации, вызванные собственным весом [23]. Поскольку высокочастотные наблюдения проводятся только ночью, тепловой деформацией конструкции телескопа, вызванной солнечным излучением, можно просто избежать. Точность поверхности антенны может быть до 0,24 мм после регулировки активной поверхности.

Рис. 2.15. 100-метровый РТ с регулируемой поверхностью ГЗ (США, Западная Вирджиния, Грин-Бэнк)

ГЗ GBT [34] имеет сегментную несимметричную конструкцию. В виду того что главный рефлектор GBT является только частью параболоида, вся апертура антенны эллиптическая, а часть каждого щита является частью кольца. ГЗ разделено на 44 кольца по радиальному направлению, в общей сложности состоящих из щитов 2004 года изготовления. 44 кольца имеют щиты одного типа и могут быть изготовлены одной же прессформой. Эти кольца изготовлены из 16 видов щитов. Это значит, что только 16 видов прессформ необходимы для изготовления всех щитов, которые могут значительно уменьшить цену обработки, однако содержат ошибки конструкции. Щиты GBT состоят из алюминиевого поверхностного слоя и усиленной алюминием рамки – нервюры. Радиальная длина одного сегментного щита составляет около 2,5 м, а ширина – 2 м. Соответствующая средняя площадь составляет около 3,9 м². Поверхностная точность каждого щита в мкм приблизительно 68, и зазор между щитами – 2 мм.

Каждые 4 смежных щита ГЗ GBT имеют один привод, а ГЗ – 2209 приводов. Специальный привод GBT представлен на рис. 2.16. Эта конструкция значительно сокращает количество приводов по сравнению с конструкцией, в которой каждый отдельный щит управляется четырьмя приводами или одним гексаподом. Она не только

Рис. 2.16. Актуатор для регулировки щитов поверхности ГЗ РТ «Green Bank»: а – физическое фото; б – чертеж узла крепления щитов

уменьшает плотность распределения приводов и общий вес антенны, но также делает щиты более равномерными.

На рис. 2.16 показана механическая конфигурация привода актуатора GBT [23]. В приводе используется пара «винт-гайка» с ходом 51 см и обеспечивает точность 25 мкм.

Система управления активной поверхностью GBT передает информацию о деформации антенны на главный компьютер через шину управления. Все кабели, подключенные к исполнительным механизмам, прокладываются в кабельном желобе для формирования кабельной сети в резервной конструкции.

Для измерения поверхности GBT использует технологию голографии [35]. Фазовая погрешность апертурной поверхности выражается полиномом Зернике, и этот вид технологии использует смещение фокуса. Крупномасштабная деформация больших антенн, вызванная собственным весом и температурой при любом угле места, может быть измерена в режиме реального времени.

Большой миллиметровый телескоп (LMT)

Регулируемая поверхность главного зеркала реализована также на миллиметровом радиотелескопе LMT (Large Millimeter Telescope) (рис. 2.17), который построен на горе Сьерра Негра в Мексике и является одним из крупнейших полноповоротных в мире инструментов этого типа. LMT имеет диаметр 50 м и работает в диапазоне длин волн от 0,85 до 4 мм. Он построен совместно с США и Мексикой на высоте 4,6 км над уровнем моря.

В радиотелескопе LMT применяется активная поверхностная регулировка ГЗ [36], и достигается поверхностная точность 75 мкм на параболоиде 50 м.

LMT не похож на GBT. Вдоль радиального направления главный рефлектор разделен в 5 колец, составленных из 5 типов щитов. Каждое кольцо, соответственно, содержит 12, 24, 48, 48, и 48 щитов изнутри наружу. Каждый щит состоит из 8 высокоточных подщитов, а ГЗ LMT – из 1440 секций в целом. Каждая подсекция изготовлена гальванопластикой из никеля, привязана к сотовым заполнителям из алюминия. Точность поверхности ее составляет 15 мкм.

В настоящее время только LMT имеет конструкцию «комбинированных щитов» [37] (рис. 2.18). По сравнению с «дизайном небольшими щитами» GBT этот метод значительно сокращает число приводов и эффектно уменьшает вес антенны (хотя структура subtruss добавляет дополнительный вес). Кроме того, она имеет преимущества: меньшего типа щиты, секции с высокой точностью обработки, а также простоту транспортировки и установки.

Активная поверхность LMT использует щит как блок регулировки. Четыре независимых привода служат для того, чтобы управлять и регулировать одиночным щитом в четырех углах. LMT использует 720 актуаторов, точность которых может достигнуть 5 мкм.

В контррефлекторе LMT также используется активная регулировка. Лазер контролирует его положение и деформации четырех вторичных ног поддержки с помощью трех приводов. Окончательно

Рис. 2.17. Радиотелескоп LMT (Large Millimeter Telescope)

а)

б)

Рис. 2.18: а – сборная панель РТ LMT (конструкция).
б – сборная панель РТ LMT (монтаж)

приводы передвигают контррефлектор к самому лучшему положению ГЗ.

Радиотелескоп на Сардинии (SRT) (рис. 2.19.)

Схема активной настройки поверхности SRT основана на конструкции активной поверхности 32-метровой антенны в Ното (Италия) [38, 39], в основном включающей конструкции ГЗ, исполнительного механизма и активную систему управления поверхностью.

Антенна 32 м в Noto была построена в 2001 и получила очень хорошую реконструкцию. Ценный опыт был приобретен путем исследования и применения активной поверхностной регулировки SRT.

ГЗ SRT имеет центральную симметрию с общим количеством щитов 1008, распределенных вдоль радиальных колец. Каждый щит состоит из алюминиевой структурной поверхности и алюминиевого Z-типа укрепления. Точность поверхности лучше, чем 65 мкм.

Рис. 2.19. Радиотелескоп на Сардинии (SRT)

Перед активной регулировкой поверхности точность SRT составляет 630 мкм. При работе в диапазоне высоких частот от 23 до 32 ГГц SRT начнет активную корректировку поверхности, чтобы компенсировать деформации, вызванные действием силы тяжести, температуры, ветровой нагрузки, и так далее. Поэтому точность поверхности колеблется от 185 до 119 мкм. В результате регулировки достигается точность 67 мкм.

Для управления и регулировки щитов используются актуаторы (рис. 2.20), суппорты которых имеют по четыре длинных шпильки,

Рис. 2.20. Конструкция актуатора для регулировки щитов ГЗ РТ SRT

соединяющие встык по четыре щита. Всего для главного зеркала используется 1116 приводов.

В отличие от первых двух обсуждаемых антенн, прецизионный привод SRT имеет две функции: для выполнения регулировки в реальном времени основной поверхности, чтобы приблизиться к идеальной; для создания искусственной деформации основного отражателя антенны. Эти две цели можно суммировать как «активная гомология» и «активная деформация». После внедрения конструкции ход привода составляет SRT 30 мм [40].

Телескоп Тяньма (рис. 2.21)

Телескоп Tianma один из самых репрезентивных радиотелескопов в Китае, диапазон работы которого покрывает 8 частотных полос, а поверхностная точность составляет 530 мкм перед активной поверхностной регулировкой.

Системы регулировки ГЗ Италии – SRT 64 м и Китая – Tianma 65 м схожи.

Главная апертура рефлектора телескопа Tianma 65 м имеет площадь до 9 стандартных баскетбольных площадок. Она состоит из 14 колец и 1008 индивидуальных высокоточных твердых щитов. Его сегментная схема аналогична схеме 64-метровой антенны SRT. Щиты от колец 1 до 12 телескопа Tianma имеют точность поверхности 0,1 мм, а от колец 13 до 14 телескопа Tianma – 0,13 мм, что представляет собой самый высокий уровень крупномасштабной технологии обработки щитов в Китае [41]. Активная поверхностная регулировка телескопа Tianma является в Китае первой.

Приводы телескопа Tianma основаны на паре «винт-гайка» и разделены на 24 группы, по 46 в каждой. Привод имеет высокую точность 15 мкм и может выдержать боковую нагрузку 150 кг.

Рис. 2.21. 65-метровый РТ с регулируемой поверхностью ГЗ (Китай, Тяньма)

Резюме и сопоставления

Метод активной настройки главного зеркала РТ применяется в четырех типичных антеннах, упомянутых выше, но их схемы регулировки сильно отличаются друг от друга. На основе анализа этих схем обсуждаются следующие пять аспектов:

- для GBT – низкая рабочая частота, для SRT – высокая рабочая частота, соответственно, главная задача – компенсация гравитационной деформации. В добавление SRT регулирует форму главного зеркала посредством приводов;

- LMT имеет самую небольшую апертуру (50 м) среди четырех антенн. ГЗ имеет уникальную конструкцию «комбинированные щиты». Преимущество заключается в снижении стоимости механической обработки «subpanel» за счет уменьшения количества приводов (актуаторов). При этом обеспечивается поверхностная точность ГЗ – 75 мкм. Однако применение структуры «subtruss» трудно приложить к конструкции антенны с супер-большой апертурой. Как, например, к радиотелескопу QTT (Китай, Синьцзян, Qitai, 110 м). Радиотелескоп QTT будет построен в 2023 году и будет крупнейшим в мире полностью управляемым полноповоротным радиотелескопом. Он принадлежит Синьцзянской астрономической обсерватории в Китайской академии наук и предназначен для работы на частотах от 300 МГц до 117 ГГц.

В GBT, SRT и телескопе Tianma применяется «конструкция малого щита», которая оптимизирует приводы таким образом, чтобы уменьшить вес антенны;

- РТ SRT и Tianma 65 м имеют приблизительно равные апертуры. Первый из них является одним из самых мощных телескопов в Европе, а второй был самостоятельно разработан в Китае. Хотя некоторые общие моменты в активной поверхностной конструкции этих двух антенн имеются: например, ГЗ обоих телескопов имеют «малые размеры щитов», они разделены в 14 колец с 1008 частями. Ход привода и точность двух антенн очень близки, но вес привода Tianma 65 м приблизительно в 1,5 раза выше, чем у SRT. По этой причине будущие исследования этого РТ должны быть сосредоточены на инновациях, чтобы разработать более легкий дизайн и улучшить производительность приводов;

- в настоящее время активная система управления поверхностью ГЗ и методы измерений четырех антенн постоянно улучшаются. Компенсация деформаций от собственного веса осуществляется по разомкнутому циклу, поэтому возникают проблемы с повторимостью результата регулировки. Для того чтобы исключить или ослабить влияние солнечного излучения, GBT работает на ночное время

в большинстве случаев. В то же время в LMT и SRT используются датчики температуры и применяются термальные меры регулирования, а в Tianma 65 м в Китае только прокладывает технологию компенсации деформации при нагреве. Для дальнейшего повышения эффективности и результативности управления поверхностью ГЗ остается еще много места для разработки метода сбора данных о рельефе поверхности и алгоритме управления компенсацией деформаций;

– антенны представленные выше, главным образом построены из традиционных материалов, таких как сталь и алюминий, но новые материалы имеют неограниченный потенциал для применения в больших антеннах. Например, в антенне CCAT, которая строится в США, применяется волокно углерода как главный материал резервной структуры, а композиционный материал использован как переход ключевых соединяющих частей и компонентов главного привода для уменьшения дополнительных физических потерь в традиционных материалах. Наконец, CCAT с физической апертурой всего 25 м работает в терагерцовой полосе частот с поверхностной точностью 10 мкм и без активной регулировки поверхности ГЗ.

Радиотелескоп Carthell Caltech Atacama (CCAT (рис. 2.22)) находится на высоте 5612 м (18 412 футов), на Серро Чаиннанторе,

Рис. 2.22. Радиотелескоп Carthell Caltech Atacama (CCAT)

в пустыне Атакама (ALMA) на севере Чили и представляет собой радиомикроскоп 25 мм класса, способный работать от 300 ГГц до 1,5 ТГц. Оптическая конструкция CCAT являет собой систему f/8 Ritchey-Chretien (RC), матрицу, способную вмещать до 1200 × 1200 пикселей.

Для улучшения характеристик антенны следует увеличить глубину исследований и диапазон применения новых материалов в сверхбольших радиотелескопах, таких как QTT.

Среди международных радиотелескопов GBT и LMT являются, соответственно, типичными примерами широкоапертурных и высокоточных телескопов. Эти две антенны были независимо разработаны в США, используя долгую историю и прочную основу в области радиоастрономии.

Таблица 2.1

**Крупнейшие радиотелескопы мира
с регулируемой поверхностью главного зеркала**

Имя	Апертура, м	Ощая масса, т	Частота, ГГц	Точность поверх- ности, мм	Точность наведе- ния, угл. сек.	Год создания	Страна	Способ крепе- ния щитов	Метод управле- ния щитами
GBT	100×110	7856	0,1– 116	0,24	1,5	2000	США	Шпиль- ка	1 актуа- тор на 4 щита
LMT	50	800	75–350	0,075	1,08	2008	Мек- сика	Шар- нир	4 актуа- тора на 1 щит
SRT	64	3000	0,3– 115	0,15	5	2011	Ита- лия	Шпиль- ка	1 актуа- тор на 4 щита
Tianna	65	2640	1,25– 46	0,3	3	2012	Ки- тай	Шпиль- ка	1 актуа- тор на 4 щита
FAST	500	–	70 MHz – 3 GHz	1–2	4	2016	Ки- тай	Гекса- под	1 гекса- под на 1 щит
Suffa	70	5000	61,5– 323	0,02	2	2023	Рос- сия, Узбе- ки- стан	Гекса- под	1 гекса- под на 1 щит

Для содействия развитию астрономической науки и технологии исследования глубокого космоса в Китае [25] китайские специалисты считают, что при строительстве и вводе в строй 110-метрового радиотелескопа QTT следует извлечь больше уроков из успешного опыта зарубежных антенн с точки зрения структурной инновационной конструкции, точности и активной компенсации поверхности, применения новых функциональных материалов и так далее.

Эти же пожелания следует отнести и к отечественным разработкам радиотелескопов мм диапазона.

Сравнивая характеристики РТ из табл. 2.1 можно заключить, что для обеспечения работы РТ–70 в диапазоне частот 61,5–323 ГГц ее отражающая поверхность, образованная щитами, должна перемещаться как твердое тело, сохраняя исходную форму параболоида неизменной. А щиты должны быть механически независимы и управляться автономно посредством гексаподов. Такой способ управления поверхностью ГЗ в полноповоротных РТ не имеет аналогов и обеспечивает точность поверхности 0,02 мм.

2.2.2. Система управления регулируемой поверхностью главного зеркала радиотелескопа РТ–70 в мм диапазоне

1. Математическая модель зеркальной системы представляется в форме сумматора радиочастиц (РЧ), сфокусированных для точечного космического источника радиоизлучений (КИР) на один пиксель ЧЭ заданных размеров, а для протяженного источника КИР – на многопиксельную матрицу ЧЭ в виде радиоизображения.

2. Каждый пиксель многопиксельной матрицы ЧЭ представляет собой колебательный контур (см. рис. 2.10).

3. РЧ выбивают из материала ЧЭ электроны с частотой следования импульсов от ударного воздействия РЧ.

4. Число выбитых электронов в единицу времени пропорционально числу РЧ за тот же промежуток времени (квантовый выход).

5. Выбитые электроны в зависимости от применяемых материалов в ЧЭ вызывают в колебательном контуре процесс протекания тока, который в свою очередь стимулирует физические процессы:

- вторичного глобального эмиссионного радиоизлучения (эффект отражения);
- вторичного локального эмиссионного электромагнитного поля (эффект самоиндукции);
- нагревание вещества ЧЭ (эффект поглощения);
- изменение несущей частоты эмиссионного радиоизлучения (эффект Комптона) и др.

6. В зависимости от выбранных физических параметров колебательного контура пикселя – емкости, индуктивности и сопротивления в контуре проявляются резонансные явления и избирательные свойства узкополосных фильтров подобно тому, как в оптике происходит разделение цветов путем выбора и настройки триады материалов (красный, синий, зеленый) в пикселях телевизионных ПЗС матриц.

7. Полезная информация в принимаемом от КИР радиоизлучении содержится в величинах интервалов между РЧ, поэтому для детектирования ее из колебательного контура пикселя ЧЭ должен быть применен время-импульсный метод демодуляции с синтезом соответствующего радиоприемника.

8. На ЧЭ радиоприемника (многопиксельная матрица болометров) кроме полезного потока РЧ от КИР отрицательно действуют собственные тепловые шумы входных элементов ЗС, фоновые космические шумы, шумы Земли, промышленные шумы, поэтому для повышения отношения мощность полезного сигнала к мощности шума ЧЭ криогенно охлаждаются и защищаются рупорными отражателями.

9. На многопиксельной матрице болометров в радиодиапазоне невозможно визуально определить, на какой пиксель сфокусирован поток от точечного КИР или на каком участке матрицы находится радиоизображение в случае протяженного КИР, поэтому подобно оптике для радиодиапазона разработаны средства локализации на матрице ЧЭ областей фокусировки. Например, суммарно-разностный алгоритм сканирования матрицы по четвертям с последующим сравнением уровней сигналов с каждой четверти между собой и определением четверти, на которую сфокусирован поток РЧ от КИР.

10. В отклонении фокуса ЗС от его теоретического положения, уменьшении мощности принимаемого сигнала и искажении полезной информации. Для уменьшения влияния деформаций ЗС на качество радиосвязи ее зеркала устанавливаются на гексаподы, которые путем сканирования этих зеркал обеспечивают компенсацию расфокусировки, то есть автофокусировку.

Существует два альтернативных подхода построения радиотелескопов, предназначенных для решения основных задач радиоастрономии. Первый подход связан с построением одиночных крупных антенных установок, составляющих основу радиотелескопа. Второй основан на использовании в составе радиотелескопа нескольких антенных установок меньших размеров, связанных в систему интерферометра.

Теоретически при равенстве площади апертуры зеркала одиночной антенны суммарной площади апертур антенн интерферометра, количество принимаемой энергии от наблюдаемого источника радиоизлучения в том и другом случае должно быть равным. Однако количество энергии, снимаемой с антенны с меньшей площадью апертуры при наблюдении объектов с очень низкими значениями уровня сигнала, может быть недостаточно для преодоления порога чувствительности приемника. В этом случае одиночная антенна имеет преимущество по чувствительности, и именно по этой причине в мировой практике строительство крупных полноповоротных антенн радиотелескопов оправдано и актуально.

Одним из основных препятствий создания крупных полноповоротных антенн радиотелескопов является то, что элементы конструкции таких радиотелескопов обладают значительной податливостью, а движущиеся части – огромными моментами инерции. Радиотелескоп как механическая система находится под действием весовых, ветровых и тепловых возмущений. Совокупность этих факторов приводит к возникновению низкочастотных нелинейных нестационарных процессов, сопровождающихся слабым демпфированием, что отрицательно сказывается на качестве приема и влияет на точность измерения координат.

Датчики углового положения радиотелескопа, данные с которых принимаются за истинные координаты радиоисточника, расположены на исполнительных осях. В этом случае зеркальная система радиотелескопа оказывается не охваченной обратной связью по угловым координатам, что вызывает некомпенсированные ошибки наведения электрической оси антенны на объект наблюдения.

Проблема получения достоверной информации о деформациях элементов конструкции радиотелескопа (задача определения полного вектора состояния системы), в частности о деформациях ЗС, о положении электрической оси ЗС и распределении потока радиоизлучения в раскрыве облучателя, является одной из главных.

На протяжении долгого времени исследования различных задач механики, проводимые при проектировании и эксплуатации радиотелескопа, выполнялись с помощью аналитических и численных методов, позволяющих получить представление об общем поведении конструкции под действием внешних воздействий.

В настоящее время для анализа задач механики больших радиотелескопов все больше начинают использоваться средства, обладающие большой вычислительной мощностью, основанные на методах конечных элементов, которые позволяют оценивать взаимное влияние всех элементов конструкции при различных внешних воздействиях.

Деформации ферменного каркаса пространственной металлоконструкции (ПМК) главного зеркала РТ, вызванные внешними возмущающими воздействиями, приводят к тому, что прикрепленные к ПМК щиты отражающей поверхности отклоняются от исходной параболической формы. Величины этих отклонений существенно зависят от способов крепления щитов к ферменному каркасу. Отклонения щитов от действия сил веса больших РТ достигают десятков миллиметров, и если не принять специальных мер компенсации этих отклонений, прием радиоизлучений в мм диапазоне становится невозможным.

Одним из возможных креплений щитов к ферменному каркасу является крепление, изображенное на рис. 2.23.

Все прямоугольные щиты отражающей поверхности зеркала соединяются встык. Углы щитов закрепляются с помощью длинных резьбовых шпилек. В местах, где сходятся углы щитов, шпильки прикрепляются к объединяющим их суппортам, а они в свою очередь – к актуаторам, которые имеют возможность автоматически перемещать суппорты путем выдвижения штоков. Другими словами, «гипотетические» точки схождения углов щитов могут смещаться относительно ферменного каркаса в направлении линии действия штоков актуаторов. Положения щитов в системе координат главного зеркала контролируются лазерной системой измерений по реперным точкам, расположенным на щитах. Очевидно, что в такой конструкции желаемое положение реперных точек не может быть достигнуто из-за нерегулируемого направления действия актуаторов. Можно только приблизиться к желаемому положению

Рис. 2.23. Узел крепления щитов отражающей поверхности к ферменному каркасу ГЗ

путем поисковой процедуры «проб и ошибок», без какой-либо гарантии обеспечения требуемого качества поверхности. Существенно не улучшает положения применение гексапода вместо актуатора, потому что невозможно однозначно определить направление его линии действия. Кроме того, такая конструкция имеет малую жесткость в поперечном направлении линии действия актуатора. И при малых углах места отражающая поверхность главного зеркала РТ имеет эффект «сползания» под тяжестью собственного веса, что подтверждается численными результатами конечно-элементного моделирования системы ANSYS [29].

Процесс регулирования отражающей поверхности ГЗ включает себя вычисления аппроксимирующего параболоида, то есть «желаемой» теоретической поверхности, в которую необходимо переместить щиты в соответствии с выбранным критерием качества. Начальным желаемым параболоидом является параболоид РТ, когда он находится в вертикальном (юстировочном) положении ГЗ. В этом положении при помощи специальных юстировочных приборов на основании законов метрологии щиты посредством механизмов крепления устанавливаются так, чтобы поверхность, которую они образуют, была бы наиболее близка к теоретическому параболоиду с заданной точностью. При перемещении ГЗ по углу места в сторону уменьшения углов конструкция зеркала деформируется под собственным весом. При этом измеряемые реперные точки поверхности зеркала образуют поле невязок с теоретической поверхностью исходного параболоида, развернутого на заданный угол от вертикального положения. В качестве целевой функции критерия близости деформированного параболоида к теоретическому параболоиду обычно выбирают сумму квадратов невязок реперных точек. Очевидно, что ряд параболоидов с отличающимися параметрами (координаты вершины и фокуса) от начального (юстировочного) параболоида могут иметь меньшие суммы невязок. Параболоид с параметрами, обеспечивающими минимальное значение целевой функции (сумме квадратов невязок) называется аппроксимирующим. В этот параболоид предлагается переместить щиты и тем самым обеспечить наивысшее качество отражающей поверхности ГЗ РТ рассматриваемого способа ее регулировки. Однако кривизна исходного параболоида не совпадает с кривизной аппроксимирующего параболоида, а поверхности щитов являются частями исходного параболоида и на аппроксимирующем параболоиде будут выглядеть как «черепица», принципиально не обеспечивая оптимальное качество поверхности без увеличения общего числа щитов или, другими словами, без уменьшения их размеров.

Для отклонения реальной поверхности ГЗ после регулировки существуют специальные метрологические оценки, которыми уже давно пользуются метрологи. Одной из таких оценок является число Штреля, которое может быть оценено при помощи статистики фазовых искажений согласно формуле, впервые примененной в этих целях Махаджаном [42], но известной задолго до этого в теории антенн как формула Рузе [43].

$$S = e^{-\sigma^2},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение от апертуры фазы фронта радиоизлучения $\sigma^2 = \left\langle (\phi - \bar{\phi})^2 \right\rangle$.

Формула Рузе – это уравнение, связывающее усиление антенны с СКО ошибок случайной поверхности. Уравнение применимо к параболическому отражателю и антеннам. Уравнение названо в честь Джона Рузе, который представил уравнение в статье, написанной им в 1952 году. Уравнение утверждает, что усиление антенны обратно пропорционально экспоненте квадрата ошибок поверхности СКО. Математически уравнение для параболических рефлекторных антенн может быть выражено:

$$2u^T B^T P e \leq 0,$$

где δ – это поверхностные СКО ошибки ГЗ; λ – длина волны; G_0 – усиление антенны в отсутствие ошибок поверхности.

Обоснование качества поверхности в зависимости от длины волны является ответственной и кропотливой задачей, поэтому точность $\delta = 0,02$ мм на $\lambda = 1$ мм – проблематична.

Другим способом крепления щитов к ферменному каркасу зеркала является способ, в соответствии с которым каждый щит устанавливается на гексапод, а он в свою очередь – на каркас.

Каждый щит имеет свое единственное место на параболоиде, и если он отклоняется из этого места, то это приводит к отклонению оптических путей лучей принимаемого радиоизлучения и падению мощности принимаемого сигнала. Для того чтобы при изменении угла места ГЗ сохранить положение щитов на исходном параболоиде, развернутым на этот угол места, параболическая поверхность РТ, образованная щитами, должна управляться как твердое тело, а ее фокальная ось сохранять неизменным свое угловое положение, подобно тому как орудие танка сохраняет свое направление на цель. С точки зрения управляемости гексаподы, на которые крепятся щиты, могут обеспечить режим, похожий на управление одним твердым телом с помощью одного гексапода с тысячами актуаторов. Для этого

требуется разработать соответствующую программу для управляющего компьютера. Однако реализация такого способа управления имеет существенные ограничения. Во-первых, установка на зеркале несколько тысяч гексаподов утяжелит конструкцию, что повлечет за собой увеличение величин ее деформаций и, соответственно, потребует увеличения длины хода штоков актуаторов для их компенсации. Во-вторых, одновременное перемещение при позиционировании всей массы щитов за приемлимое время потребует увеличения энергетических затрат. Для сравнения рассмотрим характеристики актуатора радиотелескопа GBT Green Bank USA, применяемого для регулирования поверхности 100-метрового зеркала:

- ход штока 510 мм;
- точность позиционирования 0,025 мм;
- скорость 0,25 мм/с;
- статическая нагрузка 481 кг;
- динамическая нагрузка 186 кг.

Время выдвижения штока актуатора с такими характеристиками на всю длину составляет больше 30 мин. Уменьшение времени позиционирования путем увеличения скорости приведет к дополнительным энергетическим затратам.

Желание уменьшить величину хода штоков актуаторов при регулировании положения щитов привело к «идее гомотопии параболоидов». Суть заключается в том, что при изменении углового положения ГЗ от исходного поле реперных точек, определяющих место щитов на параболоиде, сместится за счет деформаций относительно расчетного положения. Допускается, что это новое измеренное поле реперных точек более близко к другой параболической поверхности, чем к исходной. Близость к той или иной поверхности обычно определяется в статистическом смысле суммой квадратов невязок. Параболоид с минимальной суммой квадратов невязок называется аппроксимирующим.

Для каждого углового положения ГЗ существует и может быть рассчитан свой аппроксимирующий параболоид, а также определены невязки, которые компенсируются с помощью актуаторов.

Преобразование параметров параболоида отражающей поверхности ГЗ как функций изменения ее углового положения получило название «гомотопия зеркала радиотелескопа» [44].

Однако, как было отмечено выше, кривизна исходного параболоида не совпадает с кривизной аппроксимирующего параболоида, что приводит к несоответствию перемещения щитов в аппроксимирующую поверхность ГЗ по невязкам реперных точек с оптимальным их перемещением.

Для решения задачи оценки влияния весовых деформаций на качество отражающей поверхности ГЗ и их частичной компенсации за счет применения принципа гомологии были проведены исследования [43] путем моделирования полномасштабной конечно-элементной модели РТ в системе ANSYS.

В результате выполненных КЭ исследований сформулированы основные цели работы и общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа РТ–70, подверженной гравитационному воздействию.

Основные цели работы:

1. На основе вычисленных деформированных состояний основного зеркала радиотелескопа и в зависимости от различных геометрических, климатических и временных параметров построить семейство параболоидов, аппроксимирующих реальное деформированное состояние основного рефлектора, – семейство аппроксимирующих параболоидов P .

2. Перемещение контррефлектора, находящегося на деформируемых опорах, в фокус построенного аппроксимирующего параболоида.

3. Перемещение щитов зеркальной системы в точки поверхности аппроксимирующего параболоида.

Для достижения поставленных целей разработан следующий алгоритм построения:

- полномасштабной САД-модели радиотелескопа РТ–70;
- иерархических последовательностей математических моделей и проведение КЭ исследований для «настройки» построенных моделей с целью адекватного описания деформированного состояния, возникающего в радиотелескопе под действием гравитационных воздействий;
- иерархических последовательностей «гравитационных» моделей и проведение КЭ исследований деформированного состояния радиотелескопа под действием гравитационных сил.

В современной программной САД-системе была создана пространственная модель радиотелескопа, в которой учитываются следующие конструктивные элементы (рис. 2.24–2.26):

1. Основной рефлектор, состоящий из щитов (тонкостенных оболочек).

2. Ферменный каркас радиотелескопа моделируется с помощью стержневых элементов. При создании модели учитывались такие детали, как шпильки, с помощью которых происходит соединение щитов с ферменным каркасом конструкции (рис. 2.27–2.28).

3. Контррефлектор (рис. 2.29–2.30).

Puc. 2.24

Puc. 2.25

Puc. 2.26

Puc. 2.27

Puc. 2.28

Puc. 2.29

Puc. 2.30

Puc. 2.31

Puc. 2.32

Puc. 2.33

Рис. 2.34

Рис. 2.35

4. Опорно-поворотную систему (рис. 2.31–2.33).

На рис. 2.34–2.35 представлено сравнение реальной конструкции (радиотелескоп П-2500), расположенной в Крыму (г. Евпатория), и созданной пространственной модели радиотелескопа.

С целью детального описания и изучения методом прямого КЭ моделирования деформированного состояния, возникающего в радиотелескопе РТ-70, была разработана иерархическая последовательность моделей:

I. Пространственная модель I уровня – поверхность основного рефлектора состоит из идеально связанных между собой поверхностей, число которых равно числу щитов в реальной конструкции (1188 щитов); ферменный каркас моделируется с помощью теплопроводящих стержневых элементов. Стержневая модель учитывает все трубы ферменного каркаса (~ 13 000), но не учитывает теплообмен стержней по боковой поверхности с окружающей средой.

II. Пространственная модель II уровня учитывает, что в рефлекторе щиты не соединены друг с другом, то есть эта модель позволяет учитывать теплообмен с окружающей средой через боковую поверхность щитов.

III. Пространственная модель III уровня учитывает опорно-поворотное устройство.

Сохранение формы основного зеркала обеспечивается гомологичностью несущего каркаса, а фазовая компенсация деформаций осуществляется путем перемещения вторичной облучающей системы. Использование принципа гомологических деформаций позволяет значительно снизить деформации зеркальной системы, возникающие под действием гравитационных сил. Однако несмотря на то, что некомпенсируемые деформации основного зеркала составляют всего

несколько процентов от общей величины деформаций, это является препятствием для использования принципа гомологических деформаций в миллиметровом диапазоне. Разработка математических моделей и способов оценки отклонения конструкции от принципа гомологических деформаций в результате воздействия гравитационных сил на этапе конструирования является актуальной задачей.

Результаты проведенных конечно-элементных исследований, объединенные с разработанным общим алгоритмом адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа РТ-70, подверженной гравитационному воздействию, позволяют моделировать поведение радиотелескопа на этапе конструирования и в процессе дальнейшей эксплуатации.

При сравнительно малых деформациях ферменного каркаса ГЗ от действия собственного веса аппроксимирующие параболоиды отражающей поверхности по кривизне близки друг к другу, и щиты ГЗ, имеющие постоянную кривизну, в результате регулировки могут быть приближены в некотором смысле к этим аппроксимирующим параболоидам. Но положение принципиально меняется при больших деформациях, когда для обеспечения требуемой точности аппроксимации необходимо уменьшать размеры щитов.

Независимо в программных комплексах ANSYS были созданы две полномасштабные конечноэлементные модели ГЗ РТ-70. Одна – в ОАО «КБСМ», другая – в СПбГПУ. Результаты значительно отличались. Деформации, прогнозируемые СПбГПУ, составили 65 мм, а «КБСМ» – на порядок меньше [43]. Такое расхождение в результатах моделирования свидетельствует о сложности моделей зеркальных систем и необходимости их совершенствования. Автономное регулирование щитов с помощью гексаподов обеспечивает наивысшую точность приближения поверхности ГЗ к теоретической и избавляет от проблем статической неопределимости конструкций.

Угловое перемещение ГЗ больших, наземных, полноповоротных РТ типа строящегося в настоящее время в Узбекистане на плато Суффа РТ с диаметром ГЗ 70 м осуществляется посредством двух приводов наведения: азимута – угла α и угла места β относительно соответствующих непересекающихся исполнительных осей: вертикальной оси z , и горизонтальной x . Для измерения углов поворота применяются высокоточные цифровые датчики обратной связи (ЦДОС) с ценой младшего разряда в несколько долей угловой секунды (угл. сек.). При формировании отражающей поверхности ГЗ РТ исходными параметрами, определяющими среднеквадратическую ошибку (СКО) ее отклонения от теоретической поверхности параболоида, являются несущая частота принимаемых радиоизлучений, оптическая схема

зеркальной системы и ее геометрические размеры. Напомним, что отражающая поверхность РТ–70 образована щитами трапециевидальной формы, максимальный размер которых $2,5 \times 2$ м, общее число щитов 1188, имеющих 14 типоразмеров. Выбор количества щитов выходит за рамки обсуждаемой проблемы и решается методами оптимизации [45, 46] с ограничениями, связанными с точностью аппроксимации деформированных поверхностей ГЗ.

Принципы управления поверхностью ГЗ заключаются в следующем. В юстировочном положении ($\alpha_0=0$, $\beta_0=90^\circ$) геодезическими методами осуществляется измерение облака координат точек ферменного каркаса $\mathbf{R}_h$, в местах установки регуляторов щитов (гексаподов), а также облака координат реперных точек на щитах $\mathbf{R}_r$, с помощью которых определяются положения щитов относительно системы координат, расположенной в вершине параболоида. Затем ГЗ посредством приводов наведения переводится в положение (α_i , β_i), отличное от юстировочного. Для этого положения измеряется облако координат реперных точек на щитах $\mathbf{R}_r(\alpha_i, \beta_i)$, и вычисляется то же облако координат реперных точек, которое бы они имели, если бы поворот происходил без деформаций $\mathbf{R}\mathbf{0}_r(\alpha_i, \beta_i)$, то есть ГЗ поворачивалось как твердое тело. Вычисление осуществляется с помощью матрицы вращения $\mathbf{H}$ как функции углов поворота (α_i , β_i) относительно соответствующих направляющих векторов исполнительных осей ($\mathbf{n}_\alpha$, $\mathbf{n}_\beta$) в неподвижной наземной системе координат.

$$\mathbf{R}\mathbf{0}_r(\alpha_i, \beta_i) = \mathbf{H}(\alpha_i, \mathbf{n}_\alpha) * \mathbf{H}(\beta_i, \mathbf{n}_\beta) * \mathbf{R}_r,$$

$$\Delta \mathbf{R}_r(\alpha_i, \beta_i) = \mathbf{R}\mathbf{0}_r(\alpha_i, \beta_i) - \mathbf{R}_r(\alpha_i, \beta_i).$$

$\Delta \mathbf{R}_r(\alpha_i, \beta_i)$ – это облако невязок между облаком реперных точек на щитах ГЗ, развернутого в теоретическое, желаемое положение (α_i , β_i) как твердого тела, без деформаций, и фактическим измеренным облаком реперных точек на щитах ГЗ, развернутого на те же углы. Известно несколько способов образования поверхности ГЗ из четырехугольных щитов. В одном из них стыковка щитов осуществляется с помощью специального устройства, в другом – щиты механически не связаны между собой и свободно перемещаются относительно друг друга с помощью гексаподов, соединяющих щиты с ферменным каркасом посредством домкратов и шарниров Гука. В первом варианте при сравнительно простой конструкции не удастся достигнуть высокой точности СКО (0,075 мм) поверхности ГЗ. Во втором варианте при механической независимости щитов возможно достижение СКО (0,020 мм). Подобно гироскопическим устройствам, на осях шарниров актуаторов гексаподов устанавливаются прецизионные датчики измерения углового перемещения корпусов актуаторов относительно

этих осей. В корпусы актуаторов вмонтированы линейные приводы удлинения штоков с прецизионными датчиками. Такая измерительная система позволяет однозначно определять взаимное положение каждого щита и соответствующее ему место крепления на ферменном каркасе, то есть определять облако координат точек ферменного каркаса $R_h(\alpha_i, \beta_i)$. Таким образом, создаются условия для отработки гексаподами невязок $\Delta R_r(\alpha_i, \beta_i)$ и создания автоматической системы контроля формы поверхности ГЗ РТ–70 в режиме реального времени во всем диапазоне требований ее эксплуатации.

Радиотелескоп РТ–70 в комплексе строящейся обсерватории на высокогорном плато Суффа в отрогах Туркестанского хребта Республики Узбекистан будет являться основным наземным пунктом в системе интерферометра Земля-Космос по проекту «Миллиметр». С учетом уникального радиоастроклимата региона плато радиотелескоп будет преимущественно работать в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Для обоснования принимаемых технических и научных решений по созданию радиотелескопа РТ–70 с регулируемой поверхностью ГЗ в рамках проекта «Суффа» в период с 2004 по 2014 годы была проведена НИР, результатом которой явилась инновационная технология контроля формы поверхности ГЗ с использованием телеметрической системы (ТМС) фирмы «ТАИР» [47, 48] и многоматричной оптико-электронной системы контроля ОЭС НИУ ИТМО [49].

Для этого в углах каждого щита в реперных точках устанавливаются датчики, с помощью которых определяется положение систем координат щитов и контролируются стыки.

Телеметрическая система (ТМС) предназначена для измерения относительных перемещений щитов в группах из 40 щитов посредством активных опто-электронных модулей (ОЭМ) – 200 шт., а также пассивных оптических реперов (ОР) – 1440 шт. с погрешностью 0,03 мм на дальности 10 м.

Многоматричная оптико-электронная система контроля ОЭС НИУ ИТМО предназначена для измерения контрольных точек отдельных щитов относительно базовой системы координат ГЗ, расположенной в вершине параболоида, по изображениям визирных целей на матричных приемниках оптического излучения с единым длиннофокусным объективом и секционным полем анализа. ОЭС обеспечивает точность измерений 0,05 мм на дальности 30 м.

Предусмотрено сопряжение ТМС с оптической измерительной системой ОЭС НИУ ИТМО. При этом результирующая погрешность контроля поверхности ГЗ как единого параболоида, равная 0,02 мм, достигается за счет избыточности измерений.

2.3. Модели многозвенных механизмов для управления зеркальной системой

2.3.1. Математическая модель системы управления гексаподом

На гексаподной основе построены системы управления положениями главного зеркала, контррефлектора, радиоприемного устройства и щитов адаптивной отражающей поверхности.

Гексапод имеет два ряда шарниров. Один из которых условно считается связанным с неподвижным основанием, а другой – с подвижным. Подвижное основание представляет собой твердое тело, на котором закреплены шарниры. Перемещение подвижного основания приводит к перемещению шарниров, что в свою очередь приводит к изменению длин actuаторов, связывающих шарниры неподвижного основания с шарнирами подвижного. Задача состоит в том, чтобы, задавая удлинения actuаторов, перемещать подвижное основание в заданное положение. Здесь следует уточнить, что такое «заданное положение». В гексапode в каждом подвижном и неподвижном основаниях содержится по шесть шарниров. Однако для однозначного определения положения твердого тела в пространстве в прямоугольной системе координат достаточно задать координаты трех точек, принадлежащих твердому телу и не лежащих на одной прямой. Поэтому математическое описание кинематики и динамики многозвенового механизма с тремя actuаторами и тремя шарнирами на каждом основании (трипод) является корректным и однозначным. Гексапод является кинематически избыточным механизмом в том смысле, что любые сочетания из трех пар шарниров и трех actuаторов достаточны для математического описания его динамики и управления. Применение гексаподов вместо триподов обусловлено, прежде всего, увеличением нагрузочной способности механизма.

Проблема заключается в том, что мы не можем произвольно назначать при управлении вектор удлинений actuаторов и ставить ему в соответствие положение подвижного основания из-за того, что при этом будут нарушаться условия неразрывности твердого тела. Можно назначать произвольно положения подвижного основания как твердого тела в форме координат шарниров относительно начального положения и измерять их, вычислять желаемые и текущие удлинения штоков и отрабатывать их приводами actuаторов.

При позиционном управлении гексаподом стоит еще одна задача: как построить измерительную систему координат шарниров, а при динамическом управлении еще и их скоростей, так как вектор состояния динамического объекта состоит из фазовых координат и их скоростей.

Измерительная система координат шарниров обычно состоит из лазерного устройства, а также датчиков угловых и линейных скоростей. Такая система довольно сложна и габаритна. Поэтому рассматривается альтернативный вариант измерительной системы гексапода, основанной на датчиках углов поворота рамок шарниров относительно их карданных осей (рис. 2.36).

Координаты шарнира вычисляются по простому алгоритму как функция указанных углов и удлинения штока актуатора. Для реализации такой измерительной системы все шарниры должны быть оснащены встроенными цифровыми датчиками углов поворота, подобно датчикам гироскопических устройств. При оснащении измерительной системы радиомодулями, транслирующими по запросу в базовую систему управления информацию о положении шарниров гексаподов, позволяет строить сложные распределенные системы, в том числе для реализации в проекте «Суффа».

Рассмотрим физическую задачу перемещения в 3-мерном евклидовом пространстве твердого тела (ТТ) под действием на него нескольких сосредоточенных сил с разнесенными относительно центра масс точками приложения. В точках приложения нет крутящих моментов, поэтому эти точки будем называть шарнирами, а само

Рис. 2.36. Схема шарнирного крепления актуатора в многозвенном механизме

твердое тело – подвижной платформой (ПП). Силы, действующие на ПП, передаются с помощью тяг, называемых в литературе ногами (Legs), или актуаторами (АК). АК связывают ПП с неподвижным основанием (НО) посредством шарниров Гука [50, 51]. АК могут изменять свою длину путем выдвижения штоков. При выдвижении штоков в шарнирах возникают силы, направленные вдоль этих штоков. Силы действуют на ПП как на твердое тело, принуждая его перемещаться в пространстве. Очевидно, выдвижение штоков должно быть согласованным, чтобы избежать заклинивания. Групповое автоматическое согласованное выдвижение штоков составляет одну из главных задач управления рассматриваемым объектом.

При действии на ПП сил со стороны штоков АК она будет совершать поступательное движение, кроме того, относительно ее центра масс возникнет крутящий момент, под действием которого ПП будет совершать вращательное движение. При сравнительно малых скоростях поступательного и вращательного движений рассматриваемых объектов мы допускаем, что при оценке суммарных результатов их динамики справедлив принцип суперпозиции, позволяющий раздельно исследовать поступательное и вращательное движения ТТ.

Движение ТТ будем исследовать в пространстве состояний на примере гексапода (рис. 2.37).

Для исследования динамики гексапода обычно вводится две евклидовы системы координат (СК): неподвижная СК – xuz и подвижная СК – uvw , с осями постоянной длины, равной 1. Любой произвольный вектор $\mathbf{p}$ единичной длины, исходящий из центра масс P , называется направляющим вектором. Его проекции на координатные оси не превышают 1 и называются направляющими косинусами.

Рис. 2.37. Структурная схема гексапода

Если ПП повернуть вокруг направляющего вектора $\mathbf{n}$ на угол Q (в положительном направлении против часовой стрелки, если смотреть с конца этого вектора), то вместе с ней повернется и СК – uvw , единичные орты которой будут иметь проекции на исходную СК – uvw , в виде направляющих косинусов. Направления ортов исходной СК – uvw совпадают с направлениями соответствующих осей неподвижной СК – xuz . Значения направляющих косинусов повернутой вокруг направляющего вектора $\mathbf{n}$ на угол Q ПП, можно определить с помощью матрицы $\mathbf{H}(\mathbf{n}, Q)$. Умножение матрицы $\mathbf{H}(\mathbf{n}, Q)$ на любой вектор i -й точки $\mathbf{x}_{0i}$, принадлежащей ПП в исходном положении, в результате дает вектор той же точки $\mathbf{x}_i$ в новом положении повернутой ПП [52].

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{H}(\mathbf{n}, Q)\mathbf{x}_{0i}.$$

Матрица $\mathbf{H}(\mathbf{n}, Q)$ носит название матрицы вращения и является удобным средством определения новых координат шарниров ПП после ее поворота.

Вектором состояния ПП назовем вектор $\mathbf{x}_p$, компонентами которого являются:

При поступательном движении:

- линейное положение центра масс подвижной системы координат ПП относительно неподвижной системы координат;
- линейная скорость центра масс ПП относительно неподвижной системы координат.

При вращательном движении:

- угловое положение подвижной системы координат ПП относительно неподвижной системы координат;
- угловая скорость изменения углового положения подвижной системы координат ПП относительно неподвижной системы координат.

Изменение положения центра масс ПП обеспечивается силой, приложенной в этой же точке, а угловое положение – крутящим моментом относительно центра инерции, координаты которого для рассматриваемой модели совпадают с координатами центра масс.

Динамика ПП при поступательном движении рассматривается как динамика точки с сосредоточенной в ней массой $\mathbf{m}$ и параллельным переносом (без поворота) подвижной системы координат СК – uvw .

Динамика ПП при вращательном движении рассматривается как его вращение вокруг направляющего вектора $\mathbf{n}$ с моментом инерции J и соответствующим поворотом подвижной системы координат СК – uvw на угол Q .

Сила $\mathbf{f}$ и момент $\mathbf{m}_p$, приложенные к ПП, представляются в форме:

$$\mathbf{f} = m\mathbf{f} * \mathbf{n}\mathbf{f}, \quad \mathbf{m}_p = M\mathbf{m}_p * \mathbf{n},$$

где mf – модуль вектора силы; nf – направляющий вектор силы; mp – вектор крутящего момента; Mtp – модуль вектора крутящего момента; n – направляющий вектор крутящего момента.

Целью управления ПП является согласование вектора состояния xp с программным вектором состояния xp^* и отслеживание его в условиях действия внешних возмущений.

В большинстве практических случаев требование точного перевода системы из начального состояния $xp(0)$ в желаемое $xp^*(t)$ вполне может быть заменено требованием асимптотической устойчивости системы.

Это обстоятельство позволяет синтезировать систему управления как систему с линейным законом управления в виде стационарной обратной связи по состоянию:

$$u(t) = K[xp^*(t) - xp(t)],$$

где K – постоянная матрица.

Выбор матрицы обратной связи K , обеспечивающей желаемую динамику стремления вектора $xp(t)$ к состоянию $xp^*(t)$, обычно осуществляется либо по заданному расположению характеристических чисел замкнутой системы с помощью известных алгебраических методов, либо путем решения матричного уравнения Риккати. Использование этих методов наталкивается на трудности, связанные с проблемой оптимального размещения характеристических чисел замкнутой системы на комплексной плоскости или выбора весовых коэффициентов в квадратичном критерии качества.

Основной проблемой управления ПП является нахождение уравнений связи углового перемещения ПП с линейным перемещением шарниров, вызванным этим угловым перемещением. То есть при заданном направляющем векторе вращения и угле поворота ПП вокруг этого вектора нужно найти новое положение шарниров, рассчитать их новые координаты. Решение этой задачи позволяет однозначно определять путем измерения координат шарниров ПП координаты ее центра масс, направляющий вектор вращения и угол поворота относительно этого вектора.

Система управления гексаподом (ГП) как динамическим объектом включает в себя:

- математическую модель ГП (идентификатор состояния или другими словами – «наблюдатель»), состоящую из body – математической модели подвижной платформы (ПП) и блока из шести математических моделей линейных приводов актуаторов (legs) (см. рис. 2.38);

– измерительную систему для получения вектора измеряемых координат $\mathbf{X}_n$;

– контур обратной связи по измеряемым координатам вектора состояния $\mathbf{X}_n$ через матрицу $\mathbf{L}$ для получения оценок неизмеряемых координат $\bar{\mathbf{X}}_n$;

– контур обратной связи по восстановленному вектору состояния $\bar{\mathbf{X}}$ через матрицу $\mathbf{K}_{oc}$ для получения вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}$ на приводы актуаторов;

– «Computer» для задания начальных значений вектора состояния и параметров;

– генератор желаемого состояния ГП $\mathbf{X}^*$ как векторная функция программных координат пространственного положения объекта слежения.

В стационарных точках при «замороженных» параметрах модели систему дифференциальных уравнений гексапода можно линеаризовать, найти корни характеристического полинома и редуцировать, уменьшив порядок модели за счет отбрасывания корней высоких частот.

Выходными скалярными координатами, относительно которых определяется качество системы управления, являются для вращательного движения – угол между заданным (желаемым) положением оси симметрии гексапода и ее текущим положением, полученным разворотом этой оси вокруг центра тяжести. Для поступательного движения выходной координатой выбрано расстояние между длинами актуатора в желаемом и текущем положениях, определяемых величиной удлинения штока.

Основным кинематическим узлом гексапода является пара «винт-гайка», предназначенная для преобразования вращательного движения в поступательное. Это устройство обладает существенным недостатком – склонностью к заклиниванию, что не дает возможности применять его в режимах слежения, поэтому рассмотрена реализация гексапода на линейных двигателях, исключающих это нежелательное влияние.

Математические модели гексапода для исследований динамики или разработки контроллера системы управления могут быть представлены в структурной схематической форме (Simulink Matlab) или матрично-аналитической. Далее приведены обе эти формы.

2.3.2. Математическая модель гексапода в структурно-схематической форме

Математическая модель гексапода как динамического объекта управления представлена на рис. 2.39–2.50 в нотации Simulink

Рис. 2.40. Линейные скорости шарниров подвижной платформы

Рис. 2.41. Взаимное силовое влияние актуаторов друг на друга

Рис. 2.42. Вектор момента от сил в шарнирах относительно центра инерции подвижной формы

Рис. 2.44. Математическая модель актуатора гексапода

Рис. 2.45. Матрица вращения

Рис. 2.46. Электропривод актуатора

Рис. 2.47. Блок актуаторов

Рис. 2.48. Математическая модель электродвигателя

Рис. 2.49. Динамическая модель механической части актуатора гексапода

Рис. 2.50. ПИД регулятор

MatLab. По существу, на этих рисунках даны алгоритм и программа моделирования системы управления гексаподом, которая при добавлении исходных данных позволяет исследовать динамику многозвенных механизмов, структуру и принципы универсального контроллера для их управления в реальном времени.

Замечательным свойством гексапода является возможность определения новых координат шарниров путем умножения матрицы вращения на исходный вектор координат шарниров. Матрица вращения определяется как функция от заданного направления оси вращения и угла поворота [52].

2.3.3. Адаптивная платформа многозвеного механизма

Уравнения движения адаптивной платформы многозвеного механизма

Элементы зеркальной системы РТ, например КР, перископическое зеркало, приемник, должны перемещаться по трем линейным (x , y и z) и двум угловым (β и θ) координатам, где β – поворот относительно оси x , а θ – поворот относительно оси y . Поэтому целесообразно установить данные элементы ЗС на подвижную платформу, которая называется адаптивной платформой многозвеного механизма (АПММ) и перемещается шестью толкателями (рис. 2.51). Каждый толкатель состоит из штанги, электродвигателя и шарикоподшипникового винтового домкрата, позволяющего изменять длину толкателя посредством выдвижения штанги. Каждый толкатель соединен с платформой и жестким элементом основания двумя двухстепенными шарнирами (см. рис. 2.36).

Примем следующую расчетную схему (рис. 2.51): платформу с расположенным на ней элементом ЗС будем считать абсолютно твердым телом; толкатели имеют массу намного меньшую, чем платформа и элемент ЗС, поэтому будем считать их безмассовыми, а также упругодеформируемыми.

Для РТ определена базовая система координат (БСК) $E_0 = (o_0, [e^0])$, где индекс 0 служит для обозначения системы координат (СК); o_0 – вектор начала СК, $[e^0]$ – три базисных вектора единичной длины (базис), направления которых совпадают с направлением осей СК. Введем подвижную декартову систему координат $E_{\Pi} = (o_{\Pi}, [e^{\Pi}])$, помещенную в центре инерции АПММ и связанную с ней, и подвижную декартову систему координат $E_{oc} = (o_{oc}, [e^{oc}])$, помещенную в центре инерции основания РТ и связанную с ней, а также подвижную декартову систему координат $E_{\Pi c} = (o_{\Pi c}, [e^{\Pi c}])$, определяющую начальное положение АПММ.

Уравнения движения АПММ имеют вид:

$$\dot{V}_{\Pi} = \Theta_{\Pi}^{-1} [F_{\Pi} + G_{\Pi} - \Phi_{\Pi} \Theta_{\Pi} V_{\Pi}], \quad \dot{q}_{\Pi} = M_{\Pi}^{-1} [V_{\Pi} - L_{\Pi}^T M_{oc} \dot{q}_{oc}],$$

Рис. 2.51. Адаптивная платформа многозвенного механизма:
ДВ – двигатель; ИС АПММ – измерительная система положения АПММ

$$\begin{aligned}
\mathbf{G}_\Pi &= \left[\mathbf{c}_\Pi^T \mathbf{c}_{\text{ос}}^T \mathbf{m}_\Pi \mathbf{g}_0; 0; 0; 0 \right], \quad \mathbf{g}_0 = [0, 0, -9.8]^T, \quad \mathbf{q}_\Pi = \left[\mathbf{r}_\Pi^{\text{пс, пс}}; \varphi_\Pi \right], \\
\mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi &= \mathbf{c}_\Pi^T \frac{\mathbf{r}_{\text{пс}}^{\text{ос, ос}} + \mathbf{r}_\Pi^{\text{пс, пс}} + \mathbf{c}_\Pi \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} - \mathbf{r}_{\Pi i}^{\text{ос, ос}}}{\left| \mathbf{r}_{\text{пс}}^{\text{ос, ос}} + \mathbf{r}_\Pi^{\text{пс, пс}} + \mathbf{c}_\Pi \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} - \mathbf{r}_{\Pi i}^{\text{ос, ос}} \right|}, \quad \dot{\mathbf{q}}_\Pi = \left[\dot{\mathbf{r}}_\Pi^{\text{пс, пс}}; \dot{\varphi}_\Pi \right], \\
\mathbf{F}_{\Pi i} &= \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_{\Pi i} \mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi \Delta l_{ci} - \mathbf{D}_{\Pi i} \mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi \dot{\Delta l}_{ci} - \\ -\langle \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} \rangle > \mathbf{C}_{\Pi i} \mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi \Delta l_{ci} - \langle \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} \rangle > \mathbf{D}_{\Pi i} \mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi \dot{\Delta l}_{ci} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{R}_{\text{дв}i} &= \frac{\mathbf{C}_{\Pi i} \Delta l_{ci} + \mathbf{D}_{\Pi i} \dot{\Delta l}_{ci}}{i_{\text{ред}i}}, \\
\Delta l_{ci} &= \left| \mathbf{r}_{\text{пс}}^{\text{ос, ос}} + \mathbf{r}_\Pi^{\text{пс, пс}} + \mathbf{c}_\Pi \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} - \mathbf{r}_{\Pi i}^{\text{ос, ос}} \right| - \frac{\alpha_{\text{дв}i}}{i_{\text{ред}i}} - l_{\Pi i}, \\
\Delta \dot{l}_{c,i} &= \mathbf{e}_{\Pi i}^{\Pi, T} \dot{\mathbf{r}}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} + \mathbf{e}_{\Pi i}^{\Pi, T} \mathbf{c}_\Pi \langle \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} \rangle^T \boldsymbol{\varepsilon}_\Pi \dot{\varphi}_\Pi - \frac{\Omega_{\text{дв}i}}{i_{\text{ред}i}}, \quad (2.23)
\end{aligned}$$

где $\mathbf{V}_\Pi$ – проекции линейных и угловых скоростей движения АПММ в $\mathbf{E}_\Pi$ относительно $\mathbf{E}_0$; $\boldsymbol{\Theta}_\Pi$ – матрица инерции АПММ как твердого тела; $\mathbf{F}_\Pi$ – проекции сил упругого взаимодействия в $\mathbf{E}_\Pi$, действующих на АПММ; $\mathbf{G}_\Pi$ – проекции силы тяжести в $\mathbf{E}_\Pi$; $\boldsymbol{\Phi}_\Pi$ – матрица образованная из элементов $\mathbf{V}_\Pi$; $\mathbf{q}_\Pi$ и $\dot{\mathbf{q}}_\Pi$ – обобщенные координаты и обобщенные скорости АПММ; $\mathbf{M}_\Pi$ – матрица, определяющая переход от обобщенных скоростей к $\mathbf{V}_\Pi$; $\mathbf{L}_\Pi$ – матрица преобразования СК от $\mathbf{E}_0$ к $\mathbf{E}_\Pi$; $\dot{\mathbf{q}}_{\text{ос}}$ – линейные и угловые скорости перемещения $\mathbf{E}_{\text{ос}}$ относительно $\mathbf{E}_0$; $\mathbf{M}_{\text{ос}}$ – матрица, определяющая переход от $\dot{\mathbf{q}}_{\text{ос}}$ к их проекциям в $\mathbf{E}_\Pi$; $\mathbf{c}_\Pi$ – матрица вращения, определяющая угловое положение $\mathbf{E}_\Pi$ относительно $\mathbf{E}_{\text{пс}}$; $\mathbf{c}_{\text{ос}}$ – матрица вращения, определяющая угловое положение $\mathbf{E}_{\text{ос}}$ относительно $\mathbf{E}_0$; $\mathbf{r}_\Pi^{\text{пс, пс}}$ – проекции вектора перемещения центра инерции АПММ относительно начального положения в $\mathbf{E}_{\text{пс}}$; $\boldsymbol{\Phi}_\Pi$ – три угла простейших вращений, определяющие угловое положение $\mathbf{E}_\Pi$ относительно $\mathbf{E}_{\text{пс}}$; $\mathbf{e}_{\Pi i}^\Pi$ – проекции в $\mathbf{E}_\Pi$ вектора, задающего линию действия силы упругого взаимодействия i -го штока; $\mathbf{r}_{\text{пс}}^{\text{ос, ос}}$ – линейные координаты $\mathbf{E}_{\text{пс}}$ в $\mathbf{E}_{\text{ос}}$; $\mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi}$ – координаты точки крепления i -го штока на АПММ в $\mathbf{E}_\Pi$; $\mathbf{r}_{\Pi i}^{\text{ос, ос}}$ – координаты точки крепления i -го штока на основании в $\mathbf{E}_{\text{ос}}$; $\langle \mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi} \rangle >$ – кососимметрическая матрица образованная из элементов $\mathbf{r}_{\Pi i}^{\Pi, \Pi}$; $\mathbf{C}_{\Pi i}$ и $\mathbf{D}_{\Pi i}$ – коэффициенты жесткости и демпфирования i -го штока; Δl_{ci} и $\dot{\Delta l}_{ci}$ – упругая деформация и скорость упругой деформации i -го штока; $i_{\text{ред}i}$ – передаточное число редуктора; $\mathbf{R}_{\text{дв}i}$ – реакция на двигатель; $l_{\Pi i}$ – начальная длина i -го штока; $\alpha_{\text{дв}i}$ – угол поворота ротора двигателя; $\boldsymbol{\varepsilon}_\Pi$ – матрица Эйлера; $\Omega_{\text{дв}i}$ – угловая скорость двигателя.

Уравнения электродвигателя имеют вид:

$$\dot{I}_{Яi} = -\frac{1}{T_{Я}} I_{Яi} - \frac{c_e}{L_{Я}} \Omega_{двi} + \frac{1}{L_{Я}} U_{двi},$$

$$\dot{\Omega}_{двi} = \frac{c_m}{J_{дв}} I_{Яi} - \frac{\mu_{дв}}{J_{дв}} \Omega_{двi} + \frac{R_{двi}}{J_{дв}}, \quad T_{Я} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}},$$

где $I_{Яi}$ – ток якоря; $T_{Я}$ – постоянная времени якорной обмотки; $R_{Яi}$ – активное сопротивление якорной обмотки; c_e – коэффициент противо-эдс; $L_{Я}$ – индуктивность якорной обмотки; $U_{двi}$ – напряжение управления; c_m – коэффициент момента; $J_{дв}$ – момент инерции ротора; $\mu_{дв}$ – коэффициент вязкого трения на валу ротора.

Моделирование уравнений движения адаптивной платформы многозвенного механизма в MATLAB

Структура модели с указанием входов и выходов представлена на рис. 2.52, состоящая из шести блоков двигателей, шести блоков актуаторов и платформы с внешними воздействиями, управлением и связями между ними.

Рис. 2.52. Модель адаптивной платформы многозвенного механизма

Рис. 2.53. Модель электродвигателя

Рис. 2.54. Модель актуатора АПММ

Рис. 2.55. Модель платформы

На рис. 2.53–2.55 приведены структуры блоков, изображенные на рис. 2.52.

Линеаризация уравнений движения адаптивной платформы многозвеного механизма

В режиме слежения за КИР возможно линеаризовать уравнения (2.23) и привести их к виду:

$$\mathbf{A}_\Pi \ddot{\mathbf{q}}_\Pi + \mathbf{D}_\Pi \dot{\mathbf{q}}_\Pi + \mathbf{C}_\Pi \mathbf{q}_\Pi = \mathbf{G} + \mathbf{K}_\Pi \cdot \Omega_{\text{ДВ}} + \mathbf{B}_\Pi \alpha_{\text{ДВ}}, \quad (2.24)$$

где $\mathbf{A}_\Pi = \Theta_\Pi$,

[illegible]

где G – постоянная гравитационная нагрузка,

$$\begin{aligned}
& \mathbf{K}_{\Pi} = \\
& = \left[\begin{array}{c} \mathbf{D}_{\Pi 1} \frac{\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}}{i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}|}, \dots, \mathbf{D}_{\Pi 6} \frac{\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}}{i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}|} \\ \mathbf{D}_{\Pi 1} \frac{\langle \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi} \rangle (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}})}{i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}|}, \dots, \mathbf{D}_{\Pi 6} \frac{\langle \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi} \rangle (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}})}{i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}|} \end{array} \right], \\
& \mathbf{B}_{\Pi} = \\
& = \left[\begin{array}{c} \mathbf{C}_{\Pi 1} \frac{\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}}{i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}|}, \dots, \mathbf{C}_{\Pi 6} \frac{\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}}{i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}|} \\ \mathbf{C}_{\Pi 1} \frac{\langle \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi} \rangle (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}})}{i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}|}, \dots, \mathbf{C}_{\Pi 6} \frac{\langle \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi} \rangle (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}})}{i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}|} \end{array} \right], \\
& \text{дв} = [\Omega_{\text{дв}1}, \Omega_{\text{дв}2}, \dots, \Omega_{\text{дв}6}]^T, \quad \alpha_{\text{дв}} = [\alpha_{\text{дв}1}, \alpha_{\text{дв}2}, \dots, \alpha_{\text{дв}6}]^T,
\end{aligned}$$

$$\mathbf{R}_{\text{дв}} = \mathbf{P}_1 \dot{\mathbf{q}}_{\Pi} + \mathbf{P}_2 \dot{\mathbf{q}}_{\Pi} + \mathbf{P}_3 \Omega_{\text{дв}} + \mathbf{P}_4 \alpha_{\text{дв}},$$

где $\mathbf{R}_{\text{дв}}$ – реакция на двигатели,

$$\begin{aligned}
& \mathbf{P}_1 = \\
& = \left[\begin{array}{c} \mathbf{D}_{\Pi 1} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi})^T \\ i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}| \\ \vdots \\ \mathbf{D}_{\Pi 6} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi})^T \\ i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}| \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \mathbf{D}_{\Pi 1} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi})^T \langle \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi} \rangle^T \\ i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}| \\ \vdots \\ \mathbf{D}_{\Pi 6} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi})^T \langle \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi} \rangle^T \\ i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}| \end{array} \right], \\
& \mathbf{P}_2 = \\
& = \left[\begin{array}{c} \mathbf{C}_{\Pi 1} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi})^T \\ i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}| \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{\Pi 6} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi})^T \\ i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}| \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \mathbf{C}_{\Pi 1} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi})^T \langle \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi} \rangle^T \\ i_{\text{ред}1} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 1}^{\Pi, \Pi}| \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{\Pi 6} (\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi})^T \langle \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi} \rangle^T \\ i_{\text{ред}6} |\mathbf{r}_{\Pi c}^{\text{oc,oc}} - \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\text{oc,oc}} + \mathbf{r}_{\Pi 6}^{\Pi, \Pi}| \end{array} \right],
\end{aligned}$$

$$\mathbf{P}_3 = -\frac{\mathbf{D}_{\Pi i}}{(i_{\text{ред}i})^2} \cdot [1]_6, \quad \mathbf{P}_4 = -\frac{\mathbf{C}_{\Pi i}}{(i_{\text{ред}i})^2} \cdot [1]_6.$$

Уравнения электродвигателей также можно привести к уравнениям второго порядка введением замены переменной $I_{Яi} = \dot{\rho}_{Яi}$, где $\rho_{Яi}$ – заряд. Тогда получим:

$$T_{Я}\ddot{\rho}_{Яi} = -\dot{\rho}_{Яi} - \frac{c_e}{R_{Я}}\dot{\alpha}_{двi} + \frac{1}{R_{Я}}U_{двi}, J_{Дв}\ddot{\alpha}_{двi} = c_m\dot{\rho}_{Яi} - \mu_{Дв}\dot{\alpha}_{двi} + R_{двi}.$$

Уравнения движения АПММ с учетом динамики двигателей в компактном виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\mathbf{q} &= \mathbf{R} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{q} &= [q_{п}; \rho_{дв1}; \dots; \rho_{дв6}; \alpha_{дв1}; \dots; \alpha_{дв6}], \\ \mathbf{u} &= [U_{дв1}, U_{дв2}, \dots, U_{дв6}]^T, \end{aligned} \quad (2.25)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{B}$ – матрицы параметров; $\mathbf{q}$ – обобщенные координаты; $\mathbf{u}$ – управление; $\mathbf{R}$ – гравитация.

Алгоритм управления адаптивной платформой многозвенного механизма при позиционировании

Рассмотрим управление АПММ на примере привода адаптивной платформы приемника радиоизлучений. С помощью электродинамической модели ЗС рассчитывается область пространства вблизи облучателя с максимальной интенсивностью ЭМИ. Выходом ЭДМ является система координат, образованная вектором Пойтинга в этой точке и векторами электрической и магнитной напряженности поля, положение которой задается тремя углами и тремя линейными координатами. Цель управления: перевести АПММ из начального положения в желаемое, выданное ЭДМ. Для этого рассчитываются желаемые удлинения штоков актуаторов и подаются на отработку приводов.

Расчет удлинений штоков актуаторов АПММ проводится по следующему алгоритму:

1. При юстировке определяется нулевое положение АПММ ($E_{пс} = (\mathbf{o}_{пс}, [\mathbf{e}^{пс}])$) ($E_{пс} = (\mathbf{o}_{пс}, [e^{пс}])$) и координаты крепления штоков к платформе в СК АПММ $\mathbf{r}_{пш,1}^{п,п}, \mathbf{r}_{пш,2}^{п,п}, \mathbf{r}_{пш,3}^{п,п}, \mathbf{r}_{пш,4}^{п,п}, \mathbf{r}_{пш,5}^{п,п}, \mathbf{r}_{пш,6}^{п,п}$.

2. По данным ЭДМ вычисляются $\mathbf{c}_{ж}^{ок,ок}$ – матрица вращения, определяющая желаемое угловое положение АПММ в СК ОК, и $\mathbf{r}_{ж}^{ок,ок}$ – линейные координаты желаемого положения АПММ в СК ОК.

3. Относительно СК ОК, положение которой известно, с помощью лазерной измерительной системы определяется текущее положение платформы $\mathbf{r}_{п}^{ок,ок}, \delta_{п}$.

4. С помощью лазерной измерительной системы определяют координаты крепления штоков к центральной трубе в СК ОК

$\mathbf{r}_{ш,1}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{ш,2}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{ш,3}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{ш,4}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{ш,5}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{ш,6}^{ок,ок}$, координаты крепления
штоков к платформе в СК ОК $\mathbf{r}_{пш,1}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{пш,2}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{пш,3}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{пш,4}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{пш,5}^{ок,ок}, \mathbf{r}_{пш,6}^{ок,ок}$,
 $\mathbf{r}_{пш,6}^{ок,ок}$.

5. Рассчитывается линейная ошибка наведения АПО в СК ОК $\mathbf{r}_{п}^{ж,ок} = \mathbf{r}_{п}^{ок,ок} - \mathbf{r}_{ж}^{ок,ок}$, угловая ошибка наведения $\mathbf{c}_{п}^{ж} = \mathbf{c}_{ж}^{ок,Т} \Rightarrow \Phi_{п}^{ж}$,
текущие длины штоков $l_{ш,i} = \left| \mathbf{r}_{ш,ок}^{ш,ок} - \mathbf{r}_{пш,ок}^{ш,ок} \right| = \left| \mathbf{r}_{пш,п}^{ш,п} - \mathbf{r}_{ш,ок}^{ш,ок} \right|$, желаемые
длины штоков $l_{ш,ж,i} = \left| \mathbf{r}_{ш,ок}^{ш,ок} - \mathbf{r}_{ж,и}^{ш,и} \right| = \left| \mathbf{r}_{ж,и}^{ш,и} + \mathbf{c}_{ж}^{ш} \mathbf{r}_{пш,i} - \mathbf{r}_{ш,i}^{ш,и} \right|$ и удлине-
ния $\Delta l_{ш,i} = l_{ш,ж,i} - l_{ш,i}$.

6. По максимальному удлинению из $\Delta l_{ш,i}$ рассчитывается время
отработки рассогласования: $T = \Delta l_{ш,max} / v_{ред} / \Omega_{дв,ном}$.

7. Удлинения $\Delta l_{ш,i}$ выдаются на отработку приводам актуаторов
со скоростями $\Omega_{дв,i} = \Delta l_{ш,i} / T$.

Введение в контур управления РТ малоинерциального элемен-
та адаптивной платформы приемника позволяет компенсировать
ошибки наведения ГЗ и КР и снизить требования к точности их на-
ведения.

При слабовыраженной динамике наведения ГЗ и КР возможно
использование алгоритма управления АПММ, в этом случае привод
АПММ функционирует как позиционный. В позиционном режиме
привод актуатора корректируется при помощи ПИД-регулятора,
который рассчитывается классическим методом логарифмических
амплитудных характеристик (ЛАХ).

Приводы наведения на основе ГП обеспечивают повышение точ-
ности наведения за счет принципиально новых конструктивных
решений применительно к радиотелескопам и обладают высочай-
шими свойствами унификации за счет сокращения типоразмеров.
Потребности по созданию РТ нового типа непрерывно возрастают.

Гексаподы в основном имеют иностранное производство, они все
больше находят применение в разных областях в нашей стране.
В антенной технике существуют проблемы их применения, связан-
ные с сопряжением системы управления гексапода с управлением
антенны. То, что эти вопросы актуальны, показал неудачный опыт
использования гексапода для контррефлектора, установленного на
радиотелескоп РТ-64 ОКБ МЭИ в г. Калязин при его модернизации
для использования в международном проекте «Радиоастрон» в ка-
честве наземного плеча наземно-космического радиоинтерферо-
метра. Был приобретен иностранный гексапод с гидравлическими
проводами, что при суточных перепадах температур снижало его
точность. А главное, до сих пор так и не удалось согласовать систе-
мы управления гексапода и антенны. В результате этого точность
антенны по наведению совершенно не устраивала заказчика работ
АКЦ ФИАН, так как антенна в большинстве сеансов работы вме-

сте с космическим радиотелескопом неэффективно наводилась на заданный космический источник радиоизлучения. Необходимость применения гексапода для контррефлектора возникла и в новом проекте по созданию космической обсерватории «Миллиметрон» для 10-метрового трансформируемого адаптивного криогенного телескопа. Именно эти особенности телескопа и его сверхвысокая точность наведения потребовали установки гексапода. Работы в нашей стране по созданию гексапода и самого телескопа проводит НПО «ИСС им. ак. Решетнева» по договору с АКЦ ФИАН в рамках федеральной космической программы.

В связи с изложенным, в рамках НИР «Суффа» (заказчик АКЦ ФИАН) ИПМаш РАН разработал проект системы управления исполнительными механизмами типа одно- и многосекционных гексаподов со встроенной вычислительной системой на основе ПЛИС и сигнальных процессоров с реализацией в виде макета для отработки принципов управления многозвенными динамическими объектами типа «Контррефлектор», «Перескопическое зеркало» радиотелескопа РТ-70. Проект был успешно реализован путем создания универсального контроллера управления гексаподом фирмы PI M-810, прошел тестирование в среде Matlab Simulink с новым контроллером в следящем режиме и показал высокую эффективность (исполнитель ООО «Прикладная механика»).

В рамках того же проекта «Суффа» разработано программное обеспечение специализированного вычислительного устройства (СВУ) системы автоматического управления динамическими объектами в реальном времени на нейропроцессоре фирмы «Модуль». Эффективное распараллеливание вычислений достигается за счет аппаратной поддержки операции векторно-матричного умножения на процессоре NeuroMatrix®NM6406. СВУ служит для аппаратурно-программной отработки идентификаторов состояния динамических механизмов с параллельными кинематическими связями (исполнитель ООО «Р-Веком», г. Рязань, на базе Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина).

3. ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

3.1. Анализ методов идентификации динамических объектов

При решении задач управления, изучении новых процессов систем, анализе сигналов и изображений широко применяются математические модели. В современной теории управления математическим моделям отведено центральное место.

Построение модели – часто интуитивный процесс, сводящийся к формированию структуры модели с последующей настройкой ее параметров. В условиях априорной неопределенности интуиция является одной из составляющих процесса принятия решения о структуре модели [53].

Центральной проблемой построения адекватных реальному объекту моделей является не только идентификация параметров объекта, но и его структуры и состояния, что представляет нелинейную задачу математического программирования большой размерности [39, 40, 54]. Для упрощения этой задачи идентификации ее принято разбивать на ряд взаимосвязанных подзадач определения структуры модели, параметров и состояния. Данная работа сфокусирована на модификации методов наименьших квадратов [49, 41] и множествонно-функциональных методах [53, 54]. Методы идентификации в условиях реального времени можно отнести к разряду оптимизационных задач, которые требуют сложных вычислений и специализированных аппаратных средств для их реализации. До недавнего времени применение подобных подходов в задачах реального времени сдерживалось именно по этой причине. Появление метода последовательного обучения [41] дало возможность описывать сложные нелинейные системы в виде многослойной сетевой структуры. Позднее данный подход был реализован в нейросетевых технологиях. Нейронные сети были известны в 50-х годах прошлого века, но как эффективный инструмент не получили развития вплоть до 80-х годов в связи с отсутствием эффективных методов обучения и средств их аппаратной реализации. Например, основной метод обучения нейронных сетей «метод обратного распространения ошибки» может рассматриваться как частный случай применения метода последовательного обучения к структуре «многослойный персептрон» [55].

Можно выделить две основные проблемы при синтезе нейронных сетей – это переобучение и размерность сети [54, 55]. Обе они связаны с вопросом топологии сети (количества нейронов, слоев сети, функций активации и т. д.), методов обучения. На практике эти проблемы разрешаются применением специальных эвристиче-

ских методик, не имеющих точного математического обоснования. Такой подход из-за ограниченной обучающей выборки на стадии проектирования может привести к неработоспособности сети в реальных условиях.

В нейросетевых технологиях идентификация разделена на три основных направления: определение топологии сети, методы обучения и предварительная обработка данных (препроцессинг). Зачастую топология сети выбирается для конкретной задачи исходя из накопленного опыта применения подобного вида сетей на практике. Очень сложно провести сравнение эффективности применения нейронных сетей разных структур для решения одной и той же задачи. Хорошо развитых математических методов выбора топологий нейронных сетей и их сравнения не разработано. Основным практическим подходом является использование комбинированных (модульных) сетей, которые состоят из нейросетевых подсистем разных топологий, решающих одну и ту же задачу, результаты которых принимаются методом голосования. В качестве методов обучения применяются стандартные методы теории оптимизации или теории идентификации, адаптированные для определенного вида сетей. Например, препроцессинг – предварительная обработка данных, позволяющая выделить основные аспекты сигналов, удалять шумы и перевести данные в базис, удобный для дальнейшего использования в нейронных сетях.

Все существующие подходы к идентификации можно разбить на две группы: множественно-функциональные и статистические [53, 39, 40, 54]. Такое деление обусловлено различиями в учете возмущений, действующих на систему.

Многие алгоритмы параметрической идентификации построены с учетом обобщенной функциональной схемы, отражающей основные информационные потоки, используемые в процессе оценивания параметров объекта [56]. Эта схема представлена на рис. 3.1.

Как видно из рисунка, на вход исследуемого объекта подается некоторое тестовое воздействие $g(t)$, например единичное ступенчатое, единичное импульсное, гармоническое, полиномиальное, случайное и т. д. Выходной сигнал $y(t)$ представляет собой реакцию на тестовое воздействие $g(t)$. Чем динамичнее сигнал, тем больше информации он в себе содержит. Значит, в процессе идентификации необходимо искусственно провоцировать информационную насыщенность выходного сигнала $y(t)$ существенными эволюциями тестового задающего воздействия $g(t)$.

Заметим, что процесс параметрического оценивания вступает в противоречие с задачей управления объектом. Стабилизация дви-

Рис. 3.1. Обобщенная функциональная схема модели параметрического оценивания:

*$g(t)$ – задающее воздействие; $y(t)$ – выходной сигнал;
 $f_1(t)$ – входной гауссов шум; $f_2(t)$ – гауссов шум измерений выхода;
 $y_f(t)$ – зашумленный выходной сигнал*

жения объекта, к примеру, затрудняет параметрическую идентификацию по причине «обеднения» информационных потоков. Напротив, насыщение информационных потоков ведет к дестабилизации движения объекта.

Очень часто в качестве тестового воздействия используется единичное ступенчатое воздействие. Как известно, реакция на такое воздействие является переходной характеристикой объекта. Создаваемые, таким образом, информационные потоки легко реализуемы, но малоинформативны. Наибольшая информационная насыщенность имеет место в начале процессов, а к моменту достижения установившегося движения информативность процессов снижается до нуля. По этой причине для дополнительной «раскачки» исследуемого объекта к задающему воздействию добавляется случайный процесс (шум) $f_1(t)$, способствующий повышению информативности вход-выходных сигналов. В отличие от входного шума $f_1(t)$, играющего положительную роль в процессе идентификации, выходной шум $f_2(t)$ является помехой или обусловлен неточностью измерений выходного сигнала $y(t)$. Выходной шум $f_2(t)$ снижает точность решения задачи идентификации, поэтому его роль негативна, и следует стремиться к понижению величины $f_2(t)$.

Как видим, процедура идентификации требует подачи на вход объекта тестового воздействия, получения реакции на выходе объекта, регистрации процессов на входе и выходе с последующим анализом результатов. Существуют методы анализа параметров объекта по его непрерывным вход-выходным характеристикам. Однако эти методы плохо формализованы, и следовательно, их алгоритмическая реализация на ЭВМ затруднительна. Наиболее простыми представляются сбор и обработка дискретной информации. Динамические модели, параметры которых вычисляются в процессе такой идентификации, являются дискретными.

Слишком большой период квантования ведет к потере информации, а значит, к ухудшению качества получаемой модели. Уменьшение же периода квантования затрудняет процесс обработки информации, полученной в результате измерений, поскольку большая часть машинного времени расходуется на опрос датчиков.

Таким образом, для начала процесса идентификации следует предварительно грубо оценить динамические свойства объекта. Если же это затруднительно, то период квантования подбирают итерациями.

Как видим, для идентификации используются не непрерывные процессы, а выборки их измерений, проводимые с периодом квантования. Соответственно, и используемые алгоритмы параметрической идентификации ориентированы на обработку дискретных выборок.

При анализе потоковых данных статистическими идентификаторами существует проблема выбора временных интервалов «плавающего окна», что обычно плохо формализуется. Практические исследования ДО [77] показали, что при дискретном описании ДО удобно использовать матричный оператор сдвига во времени решетчатой выборки сигнала:

$$\mathbf{A}^\tau = \begin{cases} \mathbf{A}^{\text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right)} \left[1 - \frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right] + \\ + \left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi} - \text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right) \mathbf{A}^{\text{fix}(\tau)+1}, \tau \geq 0 \\ \left(\mathbf{A}^T \right)^{\text{fix}(-\tau)} \left[1 + \frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{-\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right] + \\ + \left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{-\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right) \left(\mathbf{A}^T \right)^{\text{fix}(-\tau)+1}, \tau < 0 \end{cases}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

где τ – сдвиг времени во временной области; ω_0 – частота дискретизации по времени; $\text{fix}(\dots)$ – функция округления с отбрасыванием дробной части, π – число отсчетов в окне выборки. Например, для задачи оценивания параметров разностного фильтра:

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} x[t_k - \tau_{i_1}] + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} b_{i_2,i_3} u_{i_2}[t_k - \tau_{i_2,i_3}] = 0,$$

где a_{i_1} , b_{i_2,i_3} – коэффициенты фильтра; i_1 , i_2 , i_3 – соответствующие индексы; m_1, m_2, m_{3,i_2} – максимальные значения индексов; t_k – текущий момент времени; τ_{i_1} , τ_{i_2,i_3} – временные сдвиги; x – выходная координата; u_{i_2} – управляющие воздействия, можно использовать компактную аналитическую запись:

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} \mathbf{A}^{-\tau_{i_1}} \mathbf{x} a_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \mathbf{A}^{-\tau_{i_2,i_3}} \mathbf{u}_{i_2} b_{i_2,i_3} = \boldsymbol{\varepsilon},$$

$$\mathbf{F} \mathbf{p} = \boldsymbol{\varepsilon}, \left[a_0, a_1, \dots, a_{m_1}, b_{1,0}, b_{1,1}, \dots, b_{m_2, m_{3, m_2}} \right]^T = \mathbf{p},$$

$$\left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x}, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_1}} \mathbf{x}, \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1, \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_2, m_{3, m_2}}} \mathbf{u}_{m_2} \right] = \mathbf{F}, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{x}, \mathbf{u}_{i_2}, \boldsymbol{\varepsilon}$ – соответствующие вектора отсчетов выходной координаты, управляющих воздействий и невязок; $\mathbf{p}$ – вектор оцениваемых параметров.

В качестве базового метода рассмотрим детерминированный алгоритм идентификации. В силу своей жесткой определенности детерминированный алгоритм сложно подстроить под конкретные условия функционирования, например при наличии шумов измерений. Получим общую формулировку детерминированного идентификатора из определения (1.1):

$$\sum_{i_1=1}^{m_1} \mathbf{A}^{-\tau_{i_1}} \mathbf{x} a_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \mathbf{A}^{-\tau_{i_2,i_3}} \mathbf{u}_{i_2} b_{i_2,i_3} = \mathbf{x},$$

$$\mathbf{F}^* \mathbf{p}^* = \mathbf{x}, \left[a_1, \dots, a_{m_1}, b_{1,0}, b_{1,1}, \dots, b_{m_2, m_{3, m_2}} \right]^T = \mathbf{p}^*,$$

$$\left[\mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_1}} \mathbf{x}, \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1, \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_2, m_{3, m_2}}} \mathbf{u}_{m_2} \right] = \mathbf{F}^*,$$

где $\mathbf{p}^*$ – искомые параметры разностного фильтра; $\mathbf{F}^*$ – матрица вход-выходных измерений.

Обеспечив условие полноты ранга матрицы вход-выходных измерений $\mathbf{F}^*$ достаточно активными эволюциями задающего воздействия, находим вектор оценок параметров $\mathbf{p}^*$ по формуле $\mathbf{p}^* = \mathbf{F}^{*-1} \mathbf{x}$.

Основная проблема решения задачи идентификации в данном случае заключается в том, чтобы матрица вход-выходных измерений не была вырожденной. Заметим, что если задающее воздействие или выходной сигнал не изменяются (например, в режиме стабилизации движения), то неизбежно возникает линейная зависимость столбцов, а если такая ситуация сохраняется достаточно продолжительное время, то линейно зависимыми становятся и строки. Это подтверждает необходимость «раскачки» исследуемого объекта для успешного решения задачи параметрической идентификации.

Широко используемым является статистический подход, основанный на оценивании параметров и состояния ДО, недостатком ко-

торого является жестко формулируемая структура модели объекта на этапе проектирования как результат субъективного выбора из заданного класса моделей экспертом. «Нежесткость» учитывается случайным характером неопределенных факторов и помех, модели которых задаются в виде законов распределения, как следствие необходимо использовать большие объемы данных с высокой информационной насыщенностью, что редко достигается в реальных сложных физико-технических системах.

Алгоритмы параметрической идентификации, основанные на методе наименьших квадратов (МНК-идентификаторы), находят широкое практическое применение. МНК-идентификатор выгодно отличается от детерминированного идентификатора возможностью гибкого изменения объема регрессионной выборки и не критичностью к наличию шумов в измерениях.

Переход к виду (3.1) позволяет использовать методы МНК-идентификаторов и найти оценки параметров фильтра через минимизацию целевой функции $J(\mathbf{p}) = \mathbf{p}^T \mathbf{H} \mathbf{p}$. Анализ собственных чисел матрицы и векторов $\mathbf{H} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ позволяет выполнить редукцию исходной модели с учетом априорных ограничений на частотный диапазон и информационную насыщенность данных.

Для МНК-идентификаторов характерны два типа обработки информации, согласно одному из которых информация предварительно накапливается (формируется выборка из заданного количества вход-выходных измерений), а затем решается задача параметрического оценивания каким-либо подходящим численным методом. Другой тип МНК-идентификаторов предполагает одновременное обновление регрессионной выборки и решение задачи параметрического оценивания с учетом решений, полученных на предыдущих шагах. Построенная таким образом процедура является рекурсией, а идентификатор – рекуррентным (РМНК-идентификатором).

Принцип построения уравнений параметрической идентификации на основе МНК заключается в следующем. В рассмотрение вводится регрессионный вектор $\mathbf{z}(k)$. Предсказатель $\hat{\mathbf{y}}(k, \Theta) = \mathbf{z}^T(k) \Theta$ вычисляет прогноз выходного сигнала $\mathbf{y}(k)$ с ошибкой $\mathbf{e}(k, \Theta) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{z}^T(k) \Theta$. Функция минимизации этой ошибки называется критерием наименьших квадратов с целевой функцией

$$V_N(\Theta, \mathbf{z}^N) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} [\mathbf{y}(k) - \mathbf{z}^T(k) \Theta]^2,$$

где N – объем обрабатываемой выборки.

Минимум указанной целевой функции обеспечивается вычислением параметрических оценок по формуле:

$$\Theta_N = \left[\sum_{k=1}^N \mathbf{z}(k) \mathbf{z}^T(k) \right]^{-1} \sum_{k=1}^N \mathbf{z}(k) y(k),$$

если матрица

$$\mathbf{P}(N) = \sum_{k=1}^N \mathbf{z}(k) \mathbf{z}^T(k)$$

не является особенной.

Обозначим вектор-столбец

$$\mathbf{R}(N) = \sum_{k=1}^N \mathbf{z}(k) y(k)$$

и получим компактную формулу вычисления параметрических оценок МНК:

$$\Theta_N = \mathbf{P}^{-1}(N) \mathbf{R}(N); \quad \mathbf{R}(k) = \mathbf{R}(k-1) + \mathbf{z}(k) \mathbf{z}^T(k).$$

Минимально необходимый объем выборки (так же, как и в детерминированном алгоритме) равен количеству неизвестных параметров передаточной функции. Однако нетрудно заметить, что объем выборки можно увеличить, вводя в рассмотрение новые регрессионные векторы $\mathbf{z}(k)$. Увеличение объема выборки оказывается полезным, если выборка недостаточно информативна. Такая ситуация возникает при малых эволюциях сигналов в системе или при постоянстве сигналов. Таким образом, она обогащается информацией путем увеличения ее объема. Кроме того, увеличение объема выборки способствует повышению достоверности информации при неточных измерениях или помехах $f_2(k)$ в выходном сигнале $y(k)$.

Рассмотренные выше алгоритмы требуют, чтобы на каждом шаге идентификации решение задачи оценивания параметров проводилось бы заново. Это приводит к неэкономному расходованию ресурсов ЭВМ. Помимо этого, подобная организация идентификационной процедуры может оказаться плохой по быстродействию и устойчивости. Поэтому в качестве альтернативы построены последовательные (рекуррентные) алгоритмы идентификации, вычисляющие текущую оценку параметров по предыдущей оценке с некоторой поправкой.

Вычислительная процедура рекуррентного метода наименьших квадратов строится следующим образом. В рассмотрение вводится

регрессионный вектор, а также рекуррентно обновляемая матрица вход-выходных измерений.

Формируется и промежуточный вектор

$$\mathbf{f}(k) = \mathbf{f}(k-1) + \mathbf{z}(k)\mathbf{y}(k),$$

где k – номер шага рекурсии. В соответствии с МНК можно определить вектор параметрических оценок на каждом шаге рекурсии:

$$\begin{aligned}\Theta(k) &= \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{f}(k) = \\ &= \mathbf{R}^{-1}(k)[\mathbf{f}(k-1) + \mathbf{z}(k)\mathbf{y}(k)] = \\ &= \mathbf{R}^{-1}(k)[\mathbf{R}(k-1)\Theta(k-1) + \mathbf{z}(k)\mathbf{y}(k)] = \\ &= \mathbf{R}^{-1}(k)\left\{\left[\mathbf{R}(k) - \mathbf{z}(k)\mathbf{z}^T(k)\right]\Theta(k-1) + \mathbf{z}(k)\mathbf{y}(k)\right\} = \\ &= \Theta(k-1) + \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{z}(k)\left[\mathbf{y}(k) - \mathbf{z}^T(k)\Theta(k-1)\right].\end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}(k-1); \quad \mathbf{B} = \mathbf{D}^T = \mathbf{z}(k); \quad \mathbf{C} = \mathbf{I} \quad \text{и} \quad \mathbf{R}(k) = \mathbf{A} + \mathbf{BCD}.$$

Обозначим $\mathbf{P}(k) = \mathbf{R}^{-1}(k)$ и найдем для $\mathbf{P}(k)$ аналитическое выражение, воспользовавшись леммой обращения матриц, в соответствии с которой $(\mathbf{A} + \mathbf{BCD})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\left(\mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{C}^{-1}\right)^{-1}\mathbf{DA}^{-1}$.

В результате получим:

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}(k-1) - \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)\mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)}{1 + \mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}; \\ \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{z}(k) &= \mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k) - \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)\mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}{1 + \mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)} = \\ &= \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}{1 + \mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}.\end{aligned}$$

Таким образом, рекуррентная процедура МНК имеет структуру:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}(k) &= \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}{1 + \mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}; \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k)\mathbf{z}^T(k)\mathbf{P}(k-1); \\ \Theta(k) &= \Theta(k-1) + \mathbf{K}(k)\left[\mathbf{y}(k) - \mathbf{z}^T(k)\Theta(k-1)\right].\end{aligned}$$

В случае низкого соотношения сигнал/шум и низкой информационной насыщенности данных целесообразно перейти от описания (3.1) к системе линейных неравенств с учетом интервальной оценки

β рассогласования $\mathbf{e}$ между измеренными значениями выходной координаты ДО и полученными с модели:

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\beta_1)\mathbf{p} \geq 0 \\ \mathbf{F}(\beta_2)\mathbf{p} \leq 0 \end{cases}, \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} \geq 0, \\ \text{или } \begin{cases} \mathbf{F}(\beta_1)\mathbf{p} \leq 0 \\ \mathbf{F}(\beta_2)\mathbf{p} \geq 0 \end{cases}, \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} \leq 0, \\ \sum_{i_1=0}^{m_1} \left[\mathbf{A}^{-\tau_{i_1}} \mathbf{x} + \mathbf{Ie} \right] a_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \mathbf{A}^{-\tau_{i_2,i_3}} \mathbf{u}_{i_2} b_{i_2,i_3} = 0, \quad e_i \in \beta = [\beta_1 \quad \beta_2], \\ \mathbf{F}(\beta) = \left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x} + \xi\beta, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \xi\beta, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \right. \\ \left. + \xi\beta, \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1, \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_2,m_3,m_2}} \mathbf{u}_{m_2} \right], \quad (3.2)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица; ξ – вектор из единиц.

Такое аналитическое описание может быть расширено на случай нестационарных фильтров:

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} [t_k] x[t_k - \tau_{i_1}] + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} b_{i_2,i_3} [t_k] u_{i_2} [t_k - \tau_{i_2,i_3}] = 0, \quad (3.3)$$

где нестационарные коэффициенты в (3.3) определяются как выходы динамических систем:

$$\sum_{j_1=0}^{m_4} \mu_{i_1,j_1} a_{i_1} [t_k - \tau_{j_1}] = 0, \quad \sum_{j_2=0}^{m_5} \mu_{i_2,i_3,j_2} b_{i_2,i_3} [t_k - \tau_{j_2}] = 0, \quad (3.4)$$

где j_1, j_2 – соответствующие индексы; m_4, m_5 – их максимальные значения; $\mu_{i_1,j_1}, \mu_{i_2,i_3,j_2}$ – коэффициенты соответствующих фильтров; τ_{j_1}, τ_{j_2} – временные сдвиги. Тогда для МНК-идентификатора будем иметь аналогичное выражение для целевой функции:

$$J(\mathbf{p}) = \Phi(\mathbf{p})^T \mathbf{H}_\Phi \Phi(\mathbf{p}), \quad (3.5)$$

где

$$\mathbf{H}_\Phi = \mathbf{F}_\Phi^T \mathbf{F}_\Phi, \quad \mathbf{F}_\Phi = \text{diag} \left[\begin{array}{c} \mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x}; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}; \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1; \\ \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_{m_2,m_3,m_2}} \mathbf{u}_{m_2} \end{array} \right], \\ \Phi = \left[\begin{array}{c} \Phi_0(\mu_0, \mathbf{a}_0); \dots; \Phi_{m_1}(\mu_{m_1}, \mathbf{a}_{m_1}); \\ \Phi_{1,0}(\mu_{1,0}, \mathbf{b}_{1,0}); \dots, \Phi_{m_2,m_3,m_2}(\mu_{m_2,m_3,m_2}, \mathbf{b}_{m_2,m_3,m_2}) \end{array} \right].$$

Компоненты приведенных выражений являются полиномиальными функциями от элементов из $\mathbf{p}$ и определяются согласно

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\boldsymbol{\mu}_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) x[t_k - \tau_{i_1}] + \\ + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \varphi_{i_2,i_3}(\boldsymbol{\mu}_{i_2,i_3}, \mathbf{b}_{i_2,i_3}, t_k) u_{i_2}[t_k - \tau_{i_2,i_3}] = \varepsilon[t_k].$$

Они являются выходами моделей (1.4), а $\varepsilon[t_k]$ – текущая невязка; $\boldsymbol{\mu}_{i_1}, \boldsymbol{\mu}_{i_2,i_3}$ – оцениваемые параметры фильтра; $\mathbf{a}_{i_1}, \mathbf{b}_{i_2,i_3}$ – начальные значения оцениваемых параметров в (3.4). Параметры $\boldsymbol{\mu}_{i_1}, \boldsymbol{\mu}_{i_2,i_3}, \mathbf{a}_{i_1}, \mathbf{b}_{i_2,i_3}$ формируют вектор $\mathbf{p}$.

Посредством введения интервальной оценки β рассогласования $\mathbf{e}$ между измеренными значениями выходной координаты ДО и полученными с модели задача сводится к системе полиномиальных неравенств:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_\varphi(\beta_1)\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p}) \leq 0 \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta_2)\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p}) \geq 0 \end{cases}, \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\boldsymbol{\mu}_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) \leq 0, \\ \text{или } \begin{cases} \mathbf{F}_\varphi(\beta_1)\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p}) \geq 0 \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta_2)\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p}) \leq 0 \end{cases}, \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\boldsymbol{\mu}_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) \geq 0, \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta) = \text{diag} \left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}\beta; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}\beta; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}\beta; \right. \\ \left. \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1; \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_{m_2,m_3,m_2}} \mathbf{u}_{m_2} \right]. \quad (3.6)$$

Одним из практических подходов к упрощению задач (3.5) и (3.6) является использование масштабирования модельного времени, то есть введение частоты квантования по времени как функции переменных масштабных коэффициентов. При данном подходе предполагается, что модель объекта описывает стационарный ДО, но отсчеты берутся через разные промежутки времени. Тогда выражения (3.5) и (3.6) преобразуются к виду, где функции в векторе $\boldsymbol{\varphi}$ будут зависеть от переменных временных сдвигов и параметров стационарного фильтра. Например, в случае колебательных систем масштабные коэффициенты могут быть рассчитаны по изменению периодов колебания на интервале времени, в котором определяются отсчеты «плавающего окна».

Помимо МНК в стохастической аппроксимации используются градиентные алгоритмы, например метод скоростного градиента А. Л. Фрадкова [11], однако в условиях сильных нерегулярных помех

их эффективность не высока, так как сложно соблюсти условия их применимости (к примеру, наличие нелинейных элементов, не относящихся к классу Лурье). Попыткой преодолеть данную проблему был учет в данных методах ограничений, связанных с условиями функционирования системы «объект + среда», реализуемостью законов управления и с физической адекватностью процессов в ДО. В качестве основной статистической модели используются наименее благоприятные распределения помехи. Такое описание является предельным и не учитывает реальные условия функционирования ДО, что снижает качество работы идентификаторов по конечным выборкам. Классическим примером подобного подхода является синтез фильтров Калмана, который сводится к задаче с квадратичным функционалом и, как следствие, к решению уравнения Риккати для нестационарного случая цветных помех. Данное решение затруднительно, поскольку сложно определить вес квадратичного функционала и плотность распределения помехи. Существует широкий класс высокоточных информационно-измерительных и управляющих систем ДО, для которого задание наименее благоприятных распределений возмущений не только снижает точность управления, но и приводит к потере устойчивости, а оценивание параметров не может быть описано как задача стохастической аппроксимации.

К недостаткам подобных методов стоит отнести невозможность их использования для случаев совмещения спектральных характеристик ДО, неопределенных факторов и помехи, особенно когда спектральная характеристика ДО разнесена в разные частотные диапазоны.

Альтернативным подходом являются множественно-функциональные методы идентификации [53, 57]. Их цель сводилась к нахождению параметров модели методами вариационного исчисления и численными методами оптимизации. Здесь следует выделить такие подходы, как метод максимума Понтрягина, метод вариационного погружения и т. д. В большинстве случаев идея подобных методов сводится к определению неизвестного набора параметров в результате максимизации (минимизации) некоего функционала (часто являющегося квадратичной формой между откликом реальной системы и выходом модели, параметры которой настраиваются) одним из известных методов оптимизации (Метод Ньютона и его модификации, симплекс-метод и т. д.) с учетом соответствующих ограничений, которые задают диапазоны изменения параметров системы и других величин, используются для контроля правильности модели и ее адекватности натуре. Такие множественно-функциональные методы позволяют описывать нестационарность и стохастичность ДО посредством сведения к «нежестким» моделям на

основе интервальных методов и систем неравенств, в том числе и целевых, где дается общая постановка задачи идентификации с определением структуры, параметров и состояния.

Введем $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ функцию-метрику оценки качества модели, обладающую единственным экстремумом и гладкую. Часто в качестве $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ выбирают квадратичную форму координат или параметров, описывающую отклонения модели от измеренных данных ДО, также $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ может быть выражена в виде энергетического критерия, а для задач управления $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ может быть функцией Ляпунова. Модель нелинейного, нестационарного ДО определим в общем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}), \quad (3.7)$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния ДО; $\mathbf{p}$ – параметры ДО; $\mathbf{u}$ – управляющие воздействия; $\mathbf{f}$ – возмущающие воздействия. Выберем

$$J(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{y}_0)^T \mathbf{M}(\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{y}_0) dt,$$

где $\mathbf{C}$ – матрица измеряемых выходных величин системы; $\mathbf{M}$ – нормировочная матрица, коэффициенты которой находятся по диапазону изменения компонентов вектора измеряемых величин $\mathbf{y}_0$. Для общего случая в (3.7) неизвестными являются как функция $\mathbf{F}$, так и часть компонент $\mathbf{x}$ и аргументы $\mathbf{p}$ и $\mathbf{f}$. Одним из стандартных подходов является аппроксимация (3.7) некоторой сетевой структурой, организующей численное разложение в определенный ряд, однако остается открытым вопрос выбора топологии такой структуры, базовых функций и адекватность подобного описания физическим закономерностям, невозможно оценить полноту и непротиворечивость этих моделей. Учитывая особенности ДО как объектов управления, предложена постановка задачи идентификации, основанная на анализе типов асимптотических решений при учете физических закономерностей и соответствующих ограничениях на параметры $\mathbf{p}$ и $\mathbf{f}$, а также фазовые координаты $\mathbf{x}$. Тогда задача формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i &= \sum_{j=1}^n \varphi_j(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t), \mathbf{v}_i = \sum_{j=1}^n \rho_j(\mu_i, t), \\ \beta_1 \xi &\leq \mathbf{L}_i(\dot{\mathbf{z}}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) \leq \beta_2 \xi, \mathbf{v}_{i,\min} \leq \mathbf{v}_i \leq \mathbf{v}_{i,\max}, \\ \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{C}\mathbf{z}_i - \mathbf{y}_0)^T \mathbf{M}(\mathbf{C}\mathbf{z}_i - \mathbf{y}_0) dt &= \mathbf{G}(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t) \leq \alpha \xi, \\ \mathbf{p}_{i,\min} &\leq \mathbf{p}_i \leq \mathbf{p}_{i,\max}, \mathbf{z}_{i,\min} \leq \mathbf{z}_i \leq \mathbf{z}_{i,\max}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $\mathbf{z}_i$ – асимптотические решения, аппроксимирующие $\mathbf{x}_i$ таким образом, что $\mathbf{x}_i = \mathbf{z}_i + \varepsilon$, где ε – погрешность модели; $\boldsymbol{\varphi}_j(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t)$ – базисные функции решений (чаще полиномиальные или аппроксимирующиеся полиномами на основании теоремы Вейерштрасса; $\mathbf{v}_i$ – асимптотические решения, аппроксимирующие $\mathbf{f}_i$ таким образом, что $\mathbf{f}_i = \mathbf{v}_i + \varepsilon$, где $\boldsymbol{\rho}_j(\boldsymbol{\mu}_i, t)$ – базисные функции модели внешних воздействий; $\boldsymbol{\mu}_i$ – соответствующие параметры, $\beta_1 \boldsymbol{\xi} \leq \mathbf{L}_i(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) \leq \beta_2 \boldsymbol{\xi}$ – соответствующие теоремы, аксиомы и законы модели, определяющие структуру модели и заданные в интервальном виде. Интегральная целевая функция в общем случае выбирается как конечная сумма интегралов базисных решений:

$$\sum_{i=1}^N \left(\int_{t_0}^{t_k} z_i dt - \int_{t_0}^{t_k} y_0 dt \right)^2 m_i = \mathbf{G}(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t) \leq \alpha \boldsymbol{\xi},$$

также могут быть добавлены ограничения на частотную полосу базисных решений. Постановка задачи (3.8) приводит к решению оптимизационной задачи высокой размерности и сложности, что требует создания и адаптации существующих оптимизационных процедур.

Из всего вышеизложенного следует, что при управлении динамическими объектами типа приводов наведения радиотелескопов для обеспечения их динамической точности задачи идентификации параметров и состояния нужно решать в реальном времени. Поэтому для реализации их решения должны применяться методы и вычислительные средства, обеспечивающие необходимое быстродействие. Подходы к решению этой проблемы были изложены выше.

3.2. Идентификация и анализ сигналов

Сигнал – это физическая величина, которая содержит в себе определенную информацию. Такого рода сигналы, как звук, вибрация, температура или сила света, наблюдаемы и могут быть зарегистрированы и преобразованы соответствующим прибором в электрические и за тем проанализированы. Сигналы, полученные как реакция объекта исследования на некое тестовое воздействие, являются исходными данными для построения модели объекта. Они могут иметь различную структуру (одномерные и многомерные, случайные и детерминированные и т. д.) и различную физическую природу, например, изображение – это тоже вид сигнала. Сигналы могут быть статические и динамические, структура которых не меняется и меняется со временем соответственно. Сигналы анализируются во временной (изменение амплитуды напряжения во времени), пространственной (распределение синего цвета на фотографии)

и частотной областях (определение частоты колебаний маятника). Сигналы помимо полезных составляющих могут содержать и паразитные, например шум.

Как уже отмечалось, одним из основных этапов подготовки данных для применения методов идентификации является предварительная обработка данных (препроцессинг). Целью данной обработки является выделение характерных особенностей сигналов и зависимостей, которые в дальнейшем повлияют на выбор моделей системы и методов идентификации. В некоторых случаях методы, применяемые на стадии препроцессинга, могут рассматриваться как методы идентификации. Можно выделить следующие направления препроцессинга: удаление шумов (аддитивных и мультипликативных), выделение характерных особенностей сигналов (собственных частот, затухание, моды, паттерны, фракталы и т. д.) и определение связи различных сигналов между собой (логико-вероятностный подход, логико-лингвистический подход, методы математической статистики, например корреляционный анализ и т. д.). Все это позволяет провести:

1. Нормализацию данных, дающую возможность оценить степень влияния различных факторов на процессы в системе.
2. Оценку полноты и непротиворечивости данных.
3. Редуцировать модель системы или представить общую задачу построения модели в виде набора взаимосвязанных подзадач и т. д.
4. Выбор оптимального формализма для описания системы.

Одними из самых эффективных и широко распространенных методов обработки сигналов являются корреляционный и регрессионный анализы [55, 56, 58–60].

Многие объекты исследования характеризуются множеством параметров, и по результатам наблюдения за их функционированием формируются многомерные матрицы экспериментальных данных.

Строки такой матрицы соответствуют результатам регистрации всех наблюдаемых параметров объекта в одном эксперименте, а столбцы содержат результаты наблюдений за одним параметром (фактором, вариантой) во всех экспериментах.

В матрице элемент x_{ij} соответствует значению j -й варианты в i -м наблюдении. Матрица может содержать пустые значения некоторых элементов, например, из-за пропусков в регистрации значений параметров. В многомерном анализе желательно устранить пропущенные значения. Для этого существуют специальные приемы, в частности, вычеркивание соответствующих строк матрицы или занесение средних значений вместо отсутствующих.

Таким образом, объектом исследования в многомерном анализе является многомерная случайная величина, представленная вы-

боркой конечного объема. К такой выборке применимы все методы и оценки, рассмотренные при обработке одномерных данных.

Параметры, характеризующие объект исследования, имеют разный физический смысл, и матрица данных существенно изменяется, если изменяются шкалы, в которых измеряются те или иные параметры. Матрицу данных еще до проведения анализа целесообразно привести к стандартному виду, то есть стандартизовать значения вариант.

Величины, характеризующие различные свойства объектов, могут быть независимыми или взаимосвязанными. Различают два вида зависимостей между величинами: функциональную и статистическую [59–61].

Корреляционная связь описывает следующие виды зависимостей:

1. Причинную зависимость между значениями параметров. Примером такой зависимости является взаимосвязь пропускной способности канала передачи данных и соотношения сигнал/шум (на пропускную способность влияют и другие факторы – характер помех, амплитудно-частотные характеристики канала, способ кодирования сообщений и др.). Установить однозначную связь между конкретными значениями указанных параметров не удастся. Но очевидно, что пропускная способность зависит от соотношения уровней сигнала и помех в канале. Иногда при этом причину и следствие особо не выделяют. В некоторых случаях такая корреляция является бессмысленной, например, если в качестве исходного фактора взять доходы разработчиков антивирусных программ, а за результат – количество вновь появляющихся вирусов, то можно сделать вывод, что разработчики антивирусов «стимулируют» создание вирусов.

2. Зависимость между следствиями общей причины. Подобная зависимость характерна, в частности, для скорости и безошибочности набора текста оператором (указанные факторы зависят от квалификации оператора).

3. Корреляционная зависимость определяется различными параметрами, среди которых наибольшее распространение получили показатели, характеризующие взаимосвязь двух случайных величин (парные показатели): корреляционный момент, коэффициент корреляции.

Используя понятие коэффициента корреляции, матрице данных можно поставить в соответствие квадратную матрицу оценок коэффициентов корреляции (корреляционную матрицу).

Корреляционная зависимость не обязательно устанавливается только для двух величин, с ее помощью можно анализировать свя-

зи между несколькими вариантами (множественная корреляция). А кроме линейной существуют и другие виды корреляции.

Одной из типовых задач обработки многомерных данных является определение количественной зависимости показателей качества объекта от значений его параметров и характеристик внешней среды.

Постановка задачи регрессионного анализа формулируется следующим образом [77, 88, 89]:

Имеется совокупность результатов наблюдений, где один столбец соответствует показателю, для которого необходимо установить функциональную зависимость с параметрами объекта и среды, представленными остальными столбцами.

Требуется установить количественную взаимосвязь между показателем и факторами. В таком случае задача регрессионного анализа понимается как задача выявления такой функциональной зависимости $y^* = f(x_2, x_3, \dots, x_m)$, которая наилучшим образом описывает имеющиеся экспериментальные данные.

1. Количество наблюдений достаточно для проявления статистических закономерностей относительно факторов и их взаимосвязей.

2. Обрабатываемые ЭД содержат некоторые ошибки (помехи), обусловленные погрешностями измерений, воздействием неучтенных случайных факторов.

3. Матрица результатов наблюдений является единственной информацией об изучаемом объекте, имеющейся в распоряжении перед началом исследования.

Функция $f(x_2, x_3, \dots, x_m)$, описывающая зависимость показателя от параметров, называется уравнением (функцией) регрессии. Термин «регрессия» (*regression* (лат.) – отступление, возврат к чему-либо) связан со спецификой одной из конкретных задач, решенных на стадии становления метода, и в настоящее время не отражает всей сущности последнего, но продолжает применяться.

Решение задачи регрессионного анализа целесообразно разбить на несколько этапов:

1. Предварительная обработка данных.
2. Выбор вида уравнений регрессии.
3. Вычисление коэффициентов уравнения регрессии.
4. Проверка адекватности построенной функции результатам наблюдений.

Предварительная обработка включает стандартизацию матрицы данных, расчет коэффициентов корреляции, проверку их значимости и исключение из рассмотрения незначимых параметров (эти преобразования были рассмотрены в рамках корреляционного

анализа). В результате преобразований будут получены стандартизованная матрица наблюдений и корреляционная матрица.

Задача определения функциональной зависимости, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, связана с преодолением ряда принципиальных трудностей. В общем случае для стандартизованных данных функциональную зависимость показателя от параметров можно представить в виде $y = f(u_1, u_2, \dots, u_p) + e$, где f – заранее не известная функция, подлежащая определению; e – ошибка аппроксимации данных.

Указанное уравнение принято называть выборочным уравнением регрессии y на u . Это уравнение характеризует зависимость между вариацией показателя и вариациями факторов. А мера корреляции измеряет долю вариации показателя, которая связана с вариацией факторов. Иначе говоря, корреляцию показателя и факторов нельзя трактовать как связь их уровней, а регрессионный анализ не объясняет роли факторов в создании показателя.

Еще одна особенность касается оценки степени влияния каждого фактора на показатель. Регрессионное уравнение не обеспечивает оценку раздельного влияния каждого фактора на показатель, она возможна лишь в том случае, когда все другие факторы не связаны с изучаемым фактором. Если он связан с другими, влияющими на показатель, то будет получена смешанная характеристика влияния фактора, которая содержит как непосредственное влияние фактора, так и опосредованное его влияние, оказанное через связь с другими факторами и их влиянием на показатель.

В регрессионное уравнение не рекомендуется включать факторы, слабо связанные с показателем, но тесно – с другими факторами. Не включают в уравнение и факторы, функционально связанные друг с другом (для них коэффициент корреляции равен 1). Включение таких факторов приводит к вырождению системы уравнений для оценок коэффициентов регрессии и к неопределенности решения.

Могут применяться различные меры для оценки ошибок аппроксимации. В качестве такой меры нашла широкое применение среднеквадратическая ошибка. На ее основе разработан специальный метод оценки коэффициентов уравнений регрессии – метод наименьших квадратов, который позволяет получить оценки максимального правдоподобия неизвестных коэффициентов уравнения регрессии при нормальном распределении варианта, но его можно применять и при любом другом распределении факторов.

Качество полученного уравнения регрессии оценивают по степени близости между результатами наблюдений за показателем и

предсказанными по уравнению регрессии значениями в заданных точках пространства параметров. Если результаты близки, то задачу регрессионного анализа можно считать решенной. В противном случае следует изменить уравнение регрессии (выбрать другую степень полинома или вообще иной тип уравнения) и повторить расчеты по оценке параметров.

При наличии нескольких показателей задача регрессионного анализа решается независимо для каждого из них.

Распространенным методом анализа сигналов является дискретное преобразование Фурье ДПФ [62, 63].

На практике большое распространение получило быстрое преобразование Фурье. Наиболее популярным из алгоритмов ускоренного вычисления ДПФ является так называемый метод Cooley-Tukey, позволяющий вычислить ДПФ для числа отсчетов $N=2^k$ за время порядка $N \log_2 N$. Этот способ чем-то напоминает быструю сортировку. В ходе работы алгоритма также проводится рекурсивное разбиение массива чисел на два подмассива и сведение вычисления ДПФ от целого массива к вычислению ДПФ от подмассивов в отдельности [64].

Быстрое преобразование Фурье лежит в основе цифровых корреляторов и методов свертки, активно используется при спектральном анализе, применяется при работе с длинными числами.

Для анализа изображений тоже возможно применение преобразования Фурье – двумерного Фурье преобразования [63]. В случае изображений, представляющих собой двумерный сигнал, спектром является также двумерный сигнал.

Задача идентификации осложняется наличием в сигналах шумов. Последние представлены аддитивными и мультипликативными низкочастотными/высокочастотными шумами при низком значении отношения сигнал/шум. Для очистки сигнала от помех можно использовать вейвлет фильтрацию.

В последнее время возрос интерес к другим интегральным преобразованиям, в частности, к *вейвлет-преобразованию* (дискретному волновому преобразованию) [63, 65, 66]. Оно применяется, главным образом, для анализа нестационарных сигналов и для многих задач подобного рода оказывается более эффективным, чем преобразование Фурье.

Основным отличием вейвлет-преобразования является разложение данных не по синусоидам (как для преобразования Фурье), а по другим функциям, называемым вейвлет-образующими. Вейвлет-образующие функции, в противоположность бесконечно осциллирующим синусоидам, локализованы в некоторой ограниченной области своего аргумента, а вдали от нее равны нулю или ничтожно

малы. Из-за своего математического смысла вейвлет-спектр имеет не один аргумент, а два. Переменная a соответствует периоду анализируемого сигнала, переменная b задает его временную локализацию.

Вейвлеты – это обобщенное название временных функций, имеющих вид волновых пакетов той или иной формы, локализованных по оси независимой переменной и способных к сдвигу по ней и масштабированию (сжатию-расширению). Вейвлеты создаются с помощью специальных базисных функций – прототипов, задающих их вид и свойства. По локализации во временной и частотной областях они занимают промежуточное положение между синусоидальной функцией и функцией Дирака.

При помощи вейвлетов можно приближать сложный сигнал или изображение достаточно точно или с некоторой погрешностью. Они имеют явные преимущества в представлении локальных особенностей функций по сравнению с рядами Фурье. Вейвлеты дают новые эффективные способы обработки изображений, например фильтрации. Благодаря прекрасному представлению локальных особенностей сигналов (отсутствует у преобразования Фурье) вейвлеты нашли широкое применение в качестве сильного инструмента анализа тонких особенностей сложных сигналов и изображений и их очистки от шума.

Основным подходом к анализу сложных широкополосных сигналов является их представление в виде взвешенной суммы простых составляющих. Тогда сигнал можно записать в виде:

$$S(t) = \sum_k C_k \Psi_k(t),$$

где C_k – коэффициенты разложения (несут информацию о сигнале); Ψ_k – базисные функции. Сигнал представляется совокупностью волновых пакетов, которые образованы на основе базисной функции. Число используемых при разложении сигнала вейвлетов задает уровень декомпозиции сигнала. При этом за нулевой уровень принимается сам сигнал, а уровни декомпозиции образуют ниспадающее вейвлет-дерево. Точность представления сигнала на более низкие уровни декомпозиции уменьшается, но возникает возможность фильтрации сигналов. Таким образом происходит разбиение приближения к сигналу на две составляющие – аппроксимирующую и детализирующую – с последующим дроблением с целью изменения уровня декомпозиции сигнала. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами. Многие вейвлеты описываются итерационными выра-

жениями, которые сложнее синусоиды, но легче вычисляются численными методами.

В основе непрерывного вейвлет-преобразования лежит использование двух непрерывных и интегрируемых по всей оси t функций:

- вейвлет-функция $\Psi(t)$ с нулевым значением интеграла, определяющая детали сигнала и порождающая детализирующие коэффициенты;

- масштабирующая, или скейлинг-функция $\varphi(t)$ с единичным значением интеграла, определяющая грубое приближение сигнала и порождающая коэффициенты аппроксимации (эта функция относится только к ортогональным вейвлетам).

$\Psi(t)$ создается на основе той или иной базисной функции $\Psi_0(t)$, которая определяет тип вейвлета. Эта функция должна обеспечивать выполнение следующих операций:

- смещение по оси времени $t - \Psi_0(t - b)$, где $b \in R$
- масштабирование – $a^{-1/2}\Psi_0(t/a)$, при $a > 0$ и $a \in R^+ - \{0\}$

Параметр a задает ширину этого пакета, а b – его положение. Если заданы a и b функция $\Psi(t) = a^{-1/2}\Psi_0(t/a)$ является вейвлетом.

Если энергия сигнала $s(t)$, $P(t) = \int_R s^2(t)dt$ конечна в пространстве V сигнала с областью ограничения R , то прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $s(t)$ зададим через вейвлет-коэффициенты

$$C(a, b) = \int_R s(t) a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Такое представление коэффициентов используется в стандартном пакете Wavelet Toolbox MatLab. Задача восстановления сигнала решается при помощи обратного непрерывного вейвлет-преобразования, которое может быть представлено в следующей форме:

$$s(t) = \frac{1}{K_\Psi} \int_{R^+} \int_R C(a, b) a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2},$$

где K_Ψ – константа, определяемая функцией Ψ . Причем, эти преобразования на основе детализирующей функции не всегда способны восстановить весь сигнал целиком, и появляется необходимость в использовании аппроксимирующей функции.

Непрерывное вейвлет-преобразование требует больших затрат при его вычислении. Поэтому на практике используется дискретное вейвлет – преобразование. Она достигается путем дискретизации параметров $a = 2^J$ и $b = k2^J$ на некотором подмножестве Z , где J, K –

целые числа. Тогда дискретное прямое преобразование определим через коэффициенты:

$$C(J, K) = \int_R s(t) a_0^{-J/2} \Psi(a_0^{-J} t - k) dt .$$

А обратное примет вид:

$$s(t) = \frac{1}{C_\Psi} \sum_J \sum_K C(J, K) a_0^{-J/2} \Psi(a_0^{-J} t - k).$$

Важным свойством некоторых вейвлетов является возможность кратномасштабного представления сигналов. Это означает, что сигнал может быть представлен множеством последовательных приближений в иерархически вложенных подмножествах V_j , где j – это масштабные коэффициенты. Причем чем j больше, тем уровень детализации снижается. Пусть функции $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j} t - k)$ образуют ортонормированный базис пространства V_j , тогда аппроксимация сигнала может быть записана через итерационную формулу:

$$s_j(t) = \sum_j C(J, K) \phi_{j,k}(t)$$

$$\phi_{0,0}(t) = 2 \sum_k h_k \phi(2t - k),$$

где h_k – последовательность. Применение кратномасштабности к сигналам или изображениям позволяет представлять их с разной степенью точности и детализации. При реконструкции за основу берется $\phi(t)$ и уточнение образа учетом вейвлет-функций или вейвлет-коэффициентов. Примером такого вейвлета может служить вейвлет Хаара. Для него было получено, что после прямого и обратного вейвлет-преобразования сигнал может быть однозначно восстановлен, если существуют такие коэффициенты h_k , что $\phi(\frac{t}{2}) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(t - k)$.

Рассмотрим частотный подход к вейвлет-преобразованиям. Спектр вейвлетов может быть разбит на высокочастотную и низкочастотную составляющие. Для их разделения можно использовать низкочастотный и высокочастотный фильтры. Другими словами, мы получаем детализирующие коэффициенты и коэффициенты аппроксимации. Так как фильтры передают только половину всех частотных компонентов сигналов, то не попавшие в полосу пропускания будут удалены. Если же сложить сигналы на выходах этих фильтров, то получится реконструированный сигнал, идентичный исходному. Но низкочастотный фильтр можно представить двумя

фильтрами и т. д. Таким образом, мы изменяем степень реконструкции, прореживая спектр. Это свойство может оказаться полезным при удалении высокочастотных шумов из сигналов. Идея постепенного огрубления сигналов была предложена Маллатом.

Вейвлеты дают возможность эффективной фильтрации шумов – уменьшения детализации сигналов. Это достигается снижением уровня детализирующих коэффициентов, которое может носить как глобальный ток и локальный характер. На практике используют методы, основанные на введении понятия энтропии, позволяющей оценить информативность набора коэффициентов. Сначала строится полное дерево разложения, затем анализируются поры узлов, имеющих общий корень.

3.3. Примеры идентификации систем

3.3.1. Идентификация параметров гексапода

Объектом исследования является гексапод фирмы PI М-810 (рис. 3.2).

Гексапод М-810 компании Physik Instrumente (PI) с платформой диаметром 10 см является одной из самых компактных шестикординатных систем микропозиционирования, работающих по принципу параллельной кинематики. Системы параллельной кинематики по сравнению с системами последовательной кинематики имеют большую жесткостью, меньшие габариты, не обладают движущимися кабелями, что уменьшает трение и увеличивает точность позиционирования.

Рис. 3.2. Общий вид гексапода фирмы PI М-810

Подвижная платформа гексапода приводится в движение с помощью шести независимых прецизионных бесщеточных двигателей, благодаря чему можно проводить позиционирование по трем линейным координатам (X , Y , Z) и трем координатам вращения вокруг соответствующих осей (θ_X , θ_Y , θ_Z). В гексапode М-810 используется принцип векторного управления двигателями, при этом максимальная скорость позиционирования составляет 2,5 мм/с.

Гексапод М-810 поставляется в комплекте с контроллером. Модель М-810.D12 имеет контроллер С-887.21

В комплект программного обеспечения входит пользовательское программное обеспечение PIMikroMove с широким набором возможностей и интуитивно понятным интерфейсом, драйвера LabView и библиотеки функций для разработки собственных приложений. Имеется возможность программными методами задавать точку вращения, что особенно важно для задач юстировки.

Контроллер может быть подключен к компьютеру по средствам интерфейсов TCP/IP или RS-232.

Технические характеристики гексапода фирмы PI М-810 приведены в табл. 3.1.

Гексаподы являются неотъемлемой частью современных высокоточных систем управления [95–98]. Одной из особенностей подобного рода конструкций с параллельными кинематическими схемами является нестационарность их параметров, например, меняются моменты инерции, массы (присоединенные грузы), коэффициенты жесткости, что является важным при управлении подобными конструкциями. Если моменты инерции могут быть рассчитаны на стадии проектирования и загружены в управляющую ЭВМ, то коэффициенты жесткости должны определяться в результате натурных испытаний на стенде. Методика испытаний предусматривает два подхода. Первый – это определение эквивалентной жесткости при статическом нагружении по закону Гука, определяется деформация конструкции при известном законе нагружения по формуле: $\mathbf{F} = \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}$, где $\mathbf{F}$ – известный закон нагружения; $\mathbf{C}_{eq}$ – эквивалентная матрица жесткости; $\mathbf{q}$ – деформации по каждой из координат. Второй подход – это определение жесткостей по собственным частотам системы по формуле: $\text{eig}(\mathbf{J}^{-1} \mathbf{C}_{eq}) = \Omega$, где $\mathbf{J}$ – матрица инерции; Ω – спектр системы. Матрица $\mathbf{C}_{eq}$ имеет внедиагональные элементы, и ее значения меняются в зависимости от ориентации элементов базового модуля. Подробно этот вопрос рассмотрен в [98]. Воспользуемся готовой формулой из [98] для определения эквивалентной жесткости через парциальную, считая, что они одинаковы для каждого исполнительного элемента:

$$\mathbf{C}_{eq} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i^T, \quad \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^T \langle \mathbf{r}_i \rangle \mathbf{c}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}}_i = \mathbf{C} \frac{\mathbf{c}_b^T \mathbf{r}_i \mathbf{r}_i^T \mathbf{c}_b}{(l_i)^2}, \quad (3.9)$$

Таблица 3.1

Технические характеристики гексапода фирмы PI M-810

Характеристика	M-810	Единица измерения
*Предел перемещения X, Y	± 20	мм
*Предел перемещения Z	$\pm 6,5$	мм
*Предел перемещения qx, qy	± 10	°
*Предел перемещения qz	± 30	°
Двигатель	DC-двигатель	
Ход двигателя	$\pm 7,5$	мм
Встроенный датчик	Датчик положения (угловой энкодер)	
Разрешение встроенного датчика	12800	м/об.
Минимальный шаг перемещения X, Y	1	мкм
Минимальный шаг перемещения Z	0,5	мкм
Минимальный шаг перемещения qx, qy, qz	3,5	мкрад
Стабильность позиционирования X, Y	± 2	мкм
Стабильность позиционирования Z	$\pm 0,5$	мкм
Стабильность позиционирования qx, qy, qz	± 5	мкрад
Максимальное быстродействие X, Y, Z	2,5	мм/сек.
Максимальное быстродействие qx, qy, qz	60	мрад/сек.
Стандартное быстродействие X, Y, Z	2	мм/сек.
Стандартное быстродействие qx, qy, qz	30	мрад/сек.
Механические характеристики		
Максимальная нагрузка (основание горизонтальное/произвольно)	5/2,5	кг
Прочие условия		
Диапазон рабочих температур	от 0 до +50	°C
Масса	1,7	кг
Контроллер		
Рабочее напряжение	100–240 (AC) 50/60 Гц	

* Максимальные перемещения по нескольким координатам (X, Y, Z, qX, qY, qZ) взаимозависимы.

где $\mathbf{\varepsilon}$ – матрица Эйлера; $\mathbf{r}_i$ – координаты крепления шарниров верхней платформы в системе координат верхней платформы; $\mathbf{c}$ – матрица вращения; C – парциальная жесткость исполнительного элемента; $\mathbf{c}_b$ – матрица вращения, определяющая начальное положение верхней платформы; l_i – длина i -го исполнительного механизма; $\mathbf{r}_{li}$ – вектор определяющий координаты верхних шарниров i -го исполнительного механизма относительно нижних шарниров; $\mathbf{I}$ – единичная матрица. Тогда определение жесткости можно свести к нахождению парциальной жесткости исполнительных элементов по формуле:

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q} = C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q},$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{c}_b^T \mathbf{r}_i \mathbf{r}_i^T \mathbf{c}_b}{(l_i)^2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Тогда задача идентификации C может быть записана как:

$$\begin{aligned} J &= \min_C \{ \Phi \}, C_{\min} \leq C \leq C_{\max}, \\ \Phi &= \sum_{j=1}^N (\mathbf{F}_j - \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}_j)^T (\mathbf{F}_j - \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}_j) = \\ &= \sum_{j=1}^N \left(\mathbf{F}_j - C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j \right)^T \left(\mathbf{F}_j - C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j \right) = \\ &= \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \mathbf{F}_j - 2C \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j + C^2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i \mathbf{q}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где $\mathbf{F}_j$ – j -е измерение упругих сил; $\mathbf{q}_j$ – j -е измерение упругих деформаций; $C_{\min}$ и $C_{\max}$ – минимальные и максимальные значения парциальной жесткости соответственно. Тогда решением задачи будет аргумент при

$$\Phi = \min \left\{ \Phi(C_{\min}), \Phi(C_{\max}), \Phi \left(\frac{\sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i \mathbf{q}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j} \right) \right\}$$

в диапазоне $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$.

Таблица 3.2

**Координаты верхних и нижних шарниров, система координат
с центром в середине верхней платформы**

№ шарнира	Координата по X	Координата по Y	Координата по Z
Координаты верхних шарниров, мм			
1	37,5079	8,6197	-11,31
2	11,4625	-36,0756	-11,31
3	-12,7979	-38,2006	-11,31
4	25,3173	29,7602	-11,31
5	-38,4502	6,6039	-11,31
6	-26,0702	28,8957	-11,31
Координаты нижних шарниров			
1	37,6972	-7,4269	-99,4
2	25,5905	-28,3469	-99,4
3	-26,2255	-30,8270	-99,4
4	11,6900	37,6949	-99,4
5	-38,4556	-9,5620	-99,4
6	-12,3291	36,3998	-99,4

По данным координатам верхних и нижних шарниров (табл.3.2) были вычислены начальные длины ног гексапода (табл. 3.3).

По координатам верхних и нижних шарниров гексапода была построена модель жесткости гексапода (3.10). Выбрав перемещение гексапода по оси Z на некую длину Δl , равную 1% от длины ноги гексапода, при заданной массе груза, равной 2,6 кг, были измерены текущие положения верхней платформы гексапода.

С помощью модели гексапода, построенной в программе AutoCad, были получены координаты радиус-векторов, определяющих положения центральной оси актуатора (табл. 3.4).

Также с помощью данной модели были получены координаты радиус-векторов, определяющих координаты точек крепления на нижней и верхней платформе (табл. 3.5).

Таблица 3.3

Начальные длины ног гексапода

№ ноги гексапода	Длина, мм
1	89,5398
2	89,4903
3	89,4705
4	89,5611
5	89,4121
6	89,5499

Таблица 3.4

**Координаты радиус-векторов,
определяющих положения центральной оси актуатора**

№ радиус-вектора	Координата по X	Координата по Y	Координата по Z
1	–11,9174	–11,6629	–88,0900
2	–22,0975	–21,9481	–88,0900
3	0,0000	0,0000	–88,0900
4	0,0000	0,0000	–88,0900
5	0,0000	0,0000	–88,0900
6	14,1280	12,7365	–88,0900

Таблица 3.5

**Координаты радиус-векторов, определяющих
координаты точек крепления на нижней и верхней платформе**

№ радиус-вектора	Координата по X	Координата по Y	Координата по Z
1	–37,1398	–37,1271	–88,9709
2	0,0000	0,0000	–88,9709
3	0,0000	0,0000	–88,9709
4	–32,0549	–35,1125	–88,9709
5	88,9709	0,0000	–88,9709
6	0,0000	0,0000	–88,9709

По результатам экспериментов была рассчитана парциальная жесткость актуатора, равная 685 Н/м. При найденной парциальной жесткости исполнительного элемента могут быть рассчитаны эквивалентные жесткости для произвольных положений.

Рассмотрим задачу идентификации параметров гексапода при его движении в малых отклонениях относительно заданной траектории. Гексапод может перемещаться по шести степеням свободы трем линейным перемещениям (x, y, z) и трем углам ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$), поэтому имеет смысл ввести разделение движений по шести независимым каналам исходя из суперпозиции малых перемещений. Рассмотрим идентификацию параметров на примере канала перемещения по линейной координате x . Определим структуру модели для идентификации. Выходной переменной будет являться координата линейного перемещения x . Управляющими переменными будут шесть удлинений актуаторов $u_1, \dots, u_6$. Модель для задач идентификации гексапода по координате x будет иметь вид:

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} x[t_k - \tau_{i_1}] + \sum_{i_2=1}^6 \sum_{i_3=0}^{m_2} b_{i_2, i_3} u_{i_2}[t_k - \tau_{i_2, i_3}] = 0.$$

Рис. 3.3. Результат идентификации гексапода
(— выход идентифицированной модели, * — выход реального объекта)

Используя МНК-идентификатор для стационарного случая, описанный в разделе 1.1, и при малых отклонениях перемещений гексапода построим передаточную матрицу системы.

Передаточная функция для выхода x и входа u_1 :
 $-3.022 z^3 + 6.558 z^2 - 4.734 z + 1.136$

$$z^4 - 2.183 z^3 + 1.577 z^2 - 0.3763 z + 0.0001721$$

Передаточная функция для выхода x и входа u_2 :
 $2.501 z^3 - 5.407 z^2 + 3.885 z - 0.9274$

$$z^4 - 2.154 z^3 + 1.547 z^2 - 0.3706 z + 0.0001328$$

Передаточная функция для выхода x и входа u_3 :
 $0.7856 z^3 - 1.694 z^2 + 1.213 z - 0.2883$

$$z^4 - 2.155 z^3 + 1.543 z^2 - 0.367 z + 2.749e-005$$

Передаточная функция для выхода x и входа u_4 :
 $1.587 z^3 - 3.43 z^2 + 2.464 z - 0.5877$

$$z^4 - 2.156 z^3 + 1.548 z^2 - 0.3702 z + 9.034e-005$$

Передаточная функция для выхода x и входа u_5 :
 $1.231 z^3 - 2.659 z^2 + 1.908 z - 0.4547$

$$z^4 - 2.157 z^3 + 1.548 z^2 - 0.3693 z + 5.396e-005$$

Передаточная функция для выхода x и входа u_6 :
 $-1.782 z^3 + 3.868 z^2 - 2.793 z + 0.6708$

$$z^4 - 2.177 z^3 + 1.573 z^2 - 0.3767 z + 7.558e-005$$

Результаты идентификации приведены на рис. 3.3.

3.3.2. Идентификация координат удаленных космических источников с помощью системы автосопровождения радиотелескопа

Одной из наиболее важных свойств антенн радиотелескопов является свойство определять координаты физических объектов по их радиоизлучениям. Оно положено в основу радиоугломеров (дискриминаторов) угловых положений источников радиоизлучений, в дальнейшем называемых целями. На выходе такого радиоугломера формируется сигнал, называемый сигналом ошибки $u_{co} = K_{co}(\Delta\alpha_0) * \alpha_0$, пропорциональный угловому рассогласованию между направлением на цель и электрической осью антенны α_0 . Использование сигнала ошибки в системах управления позволяет увеличить динамическую точность наведения антенны на цель, так как радиоугломер представляет собой измерительное устройство в контуре управления, которым охватываются динамические элементы зеркальной системы, координаты которых непосредственно не измеряются.

Обнаружение и сопровождение удаленных космических источников радиоизлучения (КИР) в коротковолновой части миллиметрового диапазона, координаты которых априори неизвестны, имеют ряд особенностей. Во-первых, ширина диаграммы направленности (ДНА РТ) по уровню половинной мощности не превышает 3–4 угл. сек. Во-вторых, РТ перемещаются относительно КИР за счет суточного вращения Земли с угловой скоростью до 15 угл. сек., которую нужно компенсировать для удержания КИР в пределах ДНА. В-третьих, для обнаружения источника радиоизлучения на фоне помех необходимо: либо сканирование ДНА для однаканальных радиоприемников (РП), либо применение матричных РП с последующим сканированием матриц болометров.

Рассмотрим вариант пространственной идентификации КИР со сканированием ДНА посредством приводов наведения главного зеркала (ГЗ).

РТ с помощью приводов наведения переводится в положение, соответствующее направлению вероятного нахождения КИР. Направление непрерывно отслеживается автоматически в режиме программного наведения, при этом компенсируется суточное вращение Земли.

Поиск КИР осуществляется сканированием ДНА путем приведения в движение привод азимута по закону $\alpha(t) = A_0 \sin(\omega(t))$, а привод угла места – по закону $\beta(t) = A_0 \cos(\omega(t))$. В результате фокальная ось ГЗ описывает конус, а ДНА охватывает пространство в выбранном направлении, называемом «равносигнальным (РСН)», непрерывно перемещаясь по конусу.

Если КИР не находится на РСН, то ДНА, периодически приближаясь и удаляясь от него, модулирует принимаемый сигнал радиоизлучения по амплитуде. Для определения, в каком направлении от РСН находится КИР, период перемещения ДНА по кругу $T = 2\pi / \omega$ делится на 4, и каждые четверть периода сигнал с амплитудного детектора радиоприемника, отфильтрованный от шумов, накапливается последовательно на 1-м, 2-м, 3-м и 4-м интеграторах. То есть накопление на 1-м интеграторе проходит за 1-й период, на 2-м интеграторе за 2-й период, и т. д. Сравнивая накопленные значения на интеграторах, определяют, в какой четверти круга, описываемого ДНА, находится КИР. Если накопленные значения на каждом интеграторе за четверть периода сканирования обозначить $S1, S2, S3, S4$ и соотнести их к соответствующим четвертям (рис. 3.4), то направление перемещения ДНА определяется простым логическим алгоритмом, получившим название суммарно-разностного.

При $\frac{(S1 + S2) - (S3 + S4)}{S1 + S2 + S3 + S4} > 0$ следует двигаться вверх, а при $\frac{(S2 + S3) - (S1 + S4)}{S1 + S2 + S3 + S4} < 0$ – вправо. В результате вводится поправка

Рис. 3.4. Коническое сканирование ДНА

в программу, обеспечивающую отслеживание РСН, и приводы азимута и угла места смещают ось ГЗ в сторону той четверти круга сканирования, где предполагается нахождение КИР. По мере продвижения оси ГЗ в сторону истинного углового положения КИР уменьшается разность накопленных значений радиосигнала с выхода амплитудного (квадратичного) детектора радиоприемника на всех четырех интеграторах. Это означает, что оси РСН и ДНА совпадают, а датчики ЦДОС на исполнительных осях приводов указывают на фактическое угловое положение КИР. При этом в зависимости от уменьшения абсолютного значения рассогласования между РСН и ДНА автоматически уменьшается радиус (амплитуда A_0) сканирования приводов.

Таким образом, уменьшается ошибка в определении координат КИР. Следует заметить, что описанный способ определения координат КИР не ограничивает количество периодов сканирования и времени накопления радиосигнала. Кроме того, этот способ позволяет обнаруживать КИР с угловых расстояний больших ширины ДНА, то есть с расстояний ее «боковых лепестков».

Обычно сигналы от КИР имеют шумоподобный характер и при наличии аддитивных и мультипативных помех трудно отличить, где сигнал, а где помеха. Проблемы выделения сигнала из помех выходят за рамки обсуждаемых проблем. Однако для данной конкретной задачи при ультранизких частотах сканирования ДНА фильтрация сигнала, снимаемого с амплитудного детектора, заключается в определении его математического ожидания. При имитационном моделировании данного метода идентификации для очистки сигнала от помех использовалась вейвлет-фильтрация [70].

Описанный способ идентификации координат КИР был заимствован из авторского свидетельства СССР [71], на основании которого было изготовлено устройство «БВСО» КБСМ СПб (головной фирме по созданию РТ-70) и прошло апробацию в центре дальней космической связи в Евпатории в 1984 году. Способ показал высокую эффективность идентификации КИР при малых значениях отношения сигнал/шум [72] в см диапазоне и может в настоящее время использоваться для картографирования КИР в мм диапазоне.

4. УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ НАВЕДЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА ММ ДИАПАЗОНА

4.1. Общие принципы построения моделей динамических систем как объектов управления применительно к РТ–70

При управлении динамическим объектом (ДО) в реальном времени существует несколько подходов к обеспечению требуемого качества управления. Эти подходы связаны с реализацией в регуляторах законов управления, в которых для вычисления управляющих воздействий либо используются поисковые процедуры, либо не используются. До последнего времени реализация в регуляторах наталкивалась на непреодолимые трудности из-за невозможности обеспечения вычислений в заданном темпе. Повышение точности обусловлено, прежде всего, возможностью получения достоверной оценки компонент вектора состояния, недоступных для прямого измерения. В то же время организация оптимального управления ДО описываемыми системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка (НСДУ) при ограничениях, наложенных на переменные управления и состояния, еще наталкивается на значительные методические и вычислительные трудности. К их числу, в первую очередь, следует отнести разработку численных методов определения функции оптимального управления при наличии ограничений.

Проблема синтеза системы оптимального управления, как известно, связана с решением некоторой вариационной задачи, являющаяся математической формулировкой цели управления при ограничениях. Основная трудность, возникающая при решении этой проблемы, состоит в отсутствии математического аппарата, который давал бы в общем случае решение задачи синтеза в виде оптимального оператора обратной связи.

Исключения составляют задачи синтеза линейных систем управления с квадратичными критериями качества, решение которых может быть получено в замкнутой форме. В этом случае отыскание оператора обратной связи, доставляющего минимум интегральной квадратичной оценке качества, осуществляется путем решения матричного дифференциального уравнения, известного как уравнение Риккати. Однако при таком подходе серьезной проблемой становится выбор весовых коэффициентов Q и R в целевой функции квадратичного критерия качества, обеспечивающего необходимые требования к переходному процессу с учетом ограничений.

Условие точного отслеживания ДО программной траектории движения $x^*_{пр}(t)$ в каждый момент времени соответствует его вполне

определенное желаемое состояние $\mathbf{x}^*(t)$. При наличии отклонения действительного состояния системы от желаемого $\Delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t)$ оптимальным является выбор такого управляющего воздействия, которое обеспечивает ликвидацию этого отклонения за минимально возможное время $\Delta\mathbf{x}(t) \rightarrow 0$. Задача определения $\mathbf{x}^*(t)$ адекватна задаче восстановления текущего состояния системы $\mathbf{x}(t)$ по неполным измерениям $\tilde{\mathbf{x}}^-(t)$ и решается в рамках теории синтеза идентификаторов состояния.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению различного рода задач синтеза управляющих воздействий, получивших широкое распространение, является применение методов математического программирования МП.

Трудности численного решения, связанные с необходимостью частого пересчета управляющего воздействия на основе текущей информации о состоянии ДО, приводят к отказу от реализации строгих оптимальных решений. Синтез состоит в отыскании оператора обратной связи, аппроксимирующего закон оптимального программного управления наиболее простой функциональной зависимостью от фазовых координат $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}(\mathbf{x}(t))$.

Основные трудности, возникающие при такой формулировке, связаны с использованием интегральной квадратичной оценки, в которой явно не фигурируют важнейшие требования к переходному процессу $\Delta\mathbf{x}(t) \rightarrow 0$. В первом приближении задача сводится к отысканию постоянных коэффициентов матрицы $\mathbf{K}$, наиболее близко аппроксимирующей переходный процесс. Более точная аппроксимация обеспечивается с помощью нестационарной обратной связи по состоянию, реализующей релейный закон управления.

В этом случае из условия «скоростного градиента» [73, 74] для функции Ляпунова квадратичного вида $L_p = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t)$ управляющее воздействие $\bar{\mathbf{u}}(t) = \text{sign}(\mathbf{p}^* \mathbf{x}(t))$, как будет показано далее, отыскиваются логически при заданной матрице $\mathbf{P}$.

Таким образом, использование алгоритма численного решения задачи $\Delta\mathbf{x}(t) \rightarrow 0$ позволяет осуществить конструирование близкой к оптимальной системы управления с обратной связью по состоянию с учетом ограничений L .

Однако такой подход имеет существенные недостатки. Ограничения L в реальных системах определяются не только линейными неравенствами, а могут носить невыпуклый характер. Кроме того, сами ДО имеют явно выраженные нелинейности. При сравнительно

невысоких требованиях к точности влияние этих нелинейностей не существенно. При повышении требований влияние нелинейностей начинает сказываться, и в конечном итоге при еще большем ужесточении требований динамические процессы приобретают нелинейный и нестационарный характер. Особенно ярко это проявляется в механических объектах со слабодемпфированными собственными колебаниями. Металлические конструкции некоторых объектов (например, радиотелескопов) на первой резонансной частоте f_1 имеют всплеск амплитуды около 20 дБ, то есть в 10 раз превышающей амплитуду возбуждающего воздействия, с временем затухания $t_3 \approx 10$ с. Очевидно, что повышение точности управления такими объектами связано с демпфированием колебаний за счет управляющих воздействий $u(t)$. Эффективность демпфирования прямо пропорциональна величине $\sup(u(t))$. Наибольшая эффективность демпфирования достигается тогда, когда $u(t)$ приобретает релейный характер $\bar{u}(t) = \text{sign}(\mathbf{p} * \mathbf{x}(t))$ со значением $\sup(u(t)) = U_0$. Это подтверждает известный факт из теории управления, что $\dot{\mathbf{u}}(t)$ следует искать в классе кусочно-постоянных функций $\bar{\mathbf{u}}(t)$. В математических моделях (ММ) таких объектов ступенчатый характер процессов проявляется за счет введения в них нелинейности типа ограничений или реле в прямой цепи передачи управляющих воздействий. Наличие в реальном объекте управления усилителя с ограничением по выходному сигналу является обязательным условием физической реализуемости системы управления и ставит под сомнение ее линейную модель. Поэтому большинство процессов управления приводами наведения зеркальной системой РТ, близких к оптимальным, как показано при их моделировании, носит нелинейный характер.

4.2. Концепция повышения качества процессов управления

Точность измерения фазовых координат $x_i(t)$ состояния ДО имеет известный предел. В цифровом выражении таким пределом служит цена младшего разряда датчика, измеряющего фазовую координату δ , характеризующая ширину области между двумя последовательными значениями фазовой координаты, меньше которой эти значения неразличимы. Обычно такую величину называют квантом или дискретом фазовой координаты. При измерении угловых координат поворота исполнительных осей АУ используются много-разрядные датчики оптического или индукционного типа с числом разрядов до 22, что соответствует менее 0,5 угл. сек. на один младший разряд. Измерительные устройства характеризуются шириной зоны измерений. Для РТ такая зона определяется диаграммой направленности (ДНА) на уровне половинной мощности усиления

Рис. 4.1. Концептуальное изображение квантованной зоны

принимаемого сигнала $\theta_{0,5}$. Ширина зоны составляет несколько квантов. Требования уменьшения длин волн, принимаемых антенной, приводят к сужению зоны измерений, то есть к уменьшению $\theta_{0,5}$. В этой зоне рассматриваются две точки (рис. 4.1).

Одна точка $\mathbf{x}(t)$ называется целью, другая $\mathbf{x}^*(t)$ – объектом. Квадратная область зоны шириной и длиной в один квант называется кластером минимального размера Cl^0 . Векторы $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{x}^*(t)$, характеризующие состояние объекта и цели, не постоянно находятся в определенных кластерах $Cl^0(\mathbf{x}(t))$, $Cl^0(\mathbf{x}^*(t))$, а перемещаются под воздействием управляющих и возмущающих воздействий. Основной задачей управления является перевод объекта $\mathbf{x}(t)$ из кластера $Cl^0(\mathbf{x}(t))$ в кластер цели $Cl^0(\mathbf{x}^*(t))$ или удержание его вблизи этого кластера в соответствии с выбранным критерием качества. Если на объект действуют случайные возмущения, то оценивать принадлежность $\mathbf{x}(t)$ к определенному кластеру Cl^0_i можно только с некоторой вероятностью p_i .

При наличии нелинейностей и ограничений, наложенных на фазовые координаты, при описании ММ ДО оценки его состояния можно определить только с помощью логико-вероятностных функций. При переходе от плоского пространства к многомерному фазовому кластерному пространству оценки состояния ДО также определяются системой логико-вероятностных функций. Ширина фазового пространства ограничивается максимально возможными значениями его координат исходя из физического смысла задачи. В случае если динамические процессы рассматривать в евклидовом пространстве E^n , то квадрат расстояния между двумя точками $\mathbf{x}_i$ и $\mathbf{x}_j$ в этом пространстве выражается квадратичной формой $r^2_{i,j} = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T \mathbf{P}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)$ с диагональной матрицей $\mathbf{P}$, ненулевыми элементами которой служат величины, обратные максимальным значениям фазовых координат.

При таком подходе общей универсальной мерой расстояния в фазовом пространстве может служить квант главной координаты объ-

екта δ . Тогда любое расстояние в многомерном пространстве может измеряться квантами главной координаты.

Для некоторых задач и начальных условий ширина кластера в один квант может оказаться слишком малой при вычислении оценок состояния ДО. В этом случае пространство фазовых координат возможно разбить на более крупные кластеры, принадлежность к которым также определяется посредством логико-вероятностных функций. Если из всего множества состояний ДО каждому Cl^o_i приписывать лишь один вектор, это дает возможность уменьшить размерность задачи и служит основанием для реализации процесса управления в реальном времени.

Таким образом, для управления ДО, содержащими нелинейности и ограничения на фазовые координаты, требуется разработка [1]:

- концепции кластерного пространства;
- концепции логико-вероятностных функций оценок состояния и управляющих воздействий;
- методов управления ДО в кластерном пространстве.

В итоге можно заключить, что при изложенных выше допущениях возможно выделить два подхода к синтезу законов управления сложными нелинейными ДО. Первый подход основан на линеаризации математических моделей ДО в стационарных точках, а второй – на использовании поисковых процедур принятия решений о значении управляющих воздействий.

Качество управления линейных моделей можно оценивать методом асимптотических логарифмических частотных характеристик АЛЧХ [83]. Согласно этому методу для системы задается некоторое эквивалентное синусоидальное воздействие $\alpha_3(t) = A \sin(\omega_k t + \varphi)$, с которым связывается заданная максимальная угловая скорость системы $\Omega = A\omega_k$ и максимальное угловое ускорение $\varepsilon = A(\omega_k)^2$, по которым однозначно определяется частота колебаний ω_k , называемая контрольной частотой. О качестве судят по тому, как система реагирует при подаче на нее $\alpha_3(t) = A \sin(\omega_k t + \varphi)$. Очевидно, на выходе управляемой системы будет наблюдаться процесс $\alpha_{\text{вых}}(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega_k t + \varphi_{\text{вых}})$. Значение $\alpha_{\text{вых}}(t) - \alpha_3(t) = \theta$ определяет скалярную ошибку управления, отношение $K_k = A_{\text{вых}} / A$ – коэффициент усиления на контрольной частоте, а $\varphi_{\text{вых}} - \varphi = \Delta\varphi$ – фазовое запаздывание. При заданной ошибке управления однозначно определяется K_k , который в качестве ординаты АЛЧХ, выраженной в децибеллах, называется контрольной точкой.

На рис. 4.2. приведены частотные характеристики привода азимута РТ-70 (Уссурийск), полученные в результате натурных испытаний Ю. В. Постниковым (СПбЭТУ, ЛЭТИ) [18, 75–76].

Входом гармонического воздействия был усилитель электропривода, а выходом – точки на ПМК, в которых устанавливались гироскопические датчики угловых скоростей (ДУСы) и снимались сигналы, возбуждаемые этими гармоническими воздействиями.

При заданных θ , Ω , ε контрольная точка K_K на оси частот фиксируется. С другой стороны на АЛЧХ фиксируется вертикальная асимптота, соответствующая первой механической резонансной частоте ω_p , зависящей от свойств механической части ДО (рис. 4.2). Всплеск амплитуды на частоте ω_p достигает 20 дБ. Условия устойчивости системы управления требуют гарантированных запасов величин среднечастотного участка ($\omega_p - \omega_k$), L_1 и L_2 . Поэтому стремление улучшить качество управления связано со сдвигом контрольного

Рис. 4.2. Амплитудные логарифмические частотные характеристики привода наведения РТ-70 по азимуту как $20 \lg$ отношения амплитуды частоты угловых колебаний элементов ПМК ($\omega_{пл}$ – платформы, $\omega_{юк}$ – основания и $\omega_{пр}$ – противовеса) к амплитуде частоты задающего колебательного воздействия $\omega_{дв}$

ной точки вправо и с уменьшением интервала ($\omega_p - \omega_k$), но этому препятствуют условия устойчивости. Очевидно, сдвиг контрольной точки вправо возможен только за счет демпфирования резонансного всплеска на частоте ω_p (рис. 4.3). Демпфирование за счет управления может быть осуществлено только в определенных пределах, ограниченных линейной зоной (до насыщения) усилителя в прямой цепи передачи управляющего воздействия.

Задачи управления РТ условно можно разделить на два класса: класс задач проектирования, в которых решаются принципиальные вопросы построения регуляторов в соответствии с принятыми

Рис. 4.3. Сравнительные характеристики ЖЛАХ до и после демпфирования собственной частоты колебаний первого тона механической конструкции ПМК

критериями качества, и класс задач функционирования РТ в реальном времени.

До сих пор регуляторы приводов РТ, в том числе с самонастройкой и адаптацией к внешним воздействиям, из-за жестких ограничений, связанных с производительностью вычислительных устройств, не содержали решателей, опирающихся на поисковые процедуры, характерные для неклассических методов управления.

При управлении нелинейными нестационарными ДО, на фазовые координаты которых наложены произвольные ограничения типа неравенств, классические методы управления оказываются непригодными.

При физических ограничениях фазовых координат и управляющих воздействий, а также их квантования по уровню и времени, регуляторы, основанные на линейных законах управления, не обеспечивают возрастающих требований к динамической точности СН РТ. В [77–78] разработаны новые поисковые методы, названные методами логического управления, позволяющие обеспечить соответствие требуемого качества управления РТ техническим возможностям его реализации.

4.3. Проблемы логического управления динамическими объектами

При аппроксимации уравнений ДО уравнениями в конечных разностях задачу оптимального управления можно интерпретировать как многошаговую задачу математического программирования, основной целью которого является отыскание экстремума функции многих переменных, подчиненных различным ограничениям.

При ее решении возникают следующие основные проблемы:

- задача идентификации состояния ДО при одновременном оценивании фазового вектора и вектора параметров принципиально нелинейна даже для стационарных ДО, поэтому может быть решена только с применением методов нелинейного программирования;
- решение вариационной краевой задачи максимального быстрого действия лишь в простейших случаях для стационарных ДО сводится к решению последовательности задач линейного программирования, а для подавляющего большинства реальных объектов ее решение невозможно без применения поисковых методов нелинейного программирования;
- численные методы нелинейного программирования, позволяющие решать перечисленные выше задачи, требуют сравнительно больших затрат времени на поиск решения, поэтому не могут быть реализованы в системах реального времени, для которых допусти-

мый интервал времени, за который необходимо решить эти задачи, существенно мал даже для вычислителей сверхвысокой производительности.

Поэтому для преодоления указанных трудностей задачу управления решают в два этапа. На первом этапе, называемом этапом проектирования, отыскивают параметры идентификатора состояния и оптимальную управляющую функцию, а на втором этапе смягчают требования цели управления и, используя полученные данные, реализуют в регуляторе законы управления, лишь приближенно отвечающие первоначальной цели. К ним относятся законы с квадратичным функционалом качества, приводящих к стационарной обратной связи по вектору состояния или рылейному управлению при применении метода скоростного градиента. Эти методы имеют существенный недостаток – они применимы только для локальных областей пространства состояний, так как выбор весов коэффициентов квадратичного функционала, определяющих качество процесса управления, осуществляется для стационарных условий.

4.4. Импликационное управление [79]

Управление относится к теории принятия решений о значениях управляющих воздействий, подаваемых на динамические объекты, при управлении ими в соответствии с заданными критериями качества. Задача сводится к поисковой процедуре нахождения экстремума целевой функции (обычно скалярного функционала) при различных видах ограничений, накладываемых на координаты объекта управления. Оригинальность состоит в том, что алгоритмы оптимизации представляются в виде конечных автоматов и затем приводятся к форме линейных последовательностных машин (ЛПМ). Такое приведение к форме ЛПМ позволяет задачи принятия решений исследовать численными методами путем анализа $[0,1]$ матриц, определять меры вычислительной и комбинаторной сложности алгоритмов управления.

Динамический объект

Формально динамический объект (ДО) можно описать системой дифференциальных уравнений.

Уравнение движения n -мерного ДО в разностной форме можно представить уравнением:

$$\mathbf{x}(t+\Delta t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{A}(t), u(t)),$$

где $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{A}(t)$, $u(t)$ – функции времени t , $t = \Delta t m$, $m = 0, 1, 2, \dots$; Δt – такт; $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния; $\mathbf{A}(t)$ – оператор перехода $\mathbf{x}(t)$ в $\mathbf{x}(t+\Delta t)$; $u(t)$ –

функция управления; ограничения: $x(t) \in H$, $u(t) \in (U, -U)$. Будем полагать, что $u(t)$ является кусочно-постоянной функцией на интервале Δt и принимает одно из двух возможных значений $U, -U$; ставить ей в соответствие логическую переменную (ЛП) $l(t) \in (true, false)$, условно принимающую значения двух типов: логического типа $true=1$, $false=0$ и вещественного типа, называемое атрибутом ЛП, например вероятность [1].

Цель управления

Целью управления является отыскание допустимой управляющей функции, переводящей ДО из начального состояния в некоторую точку целевого множества, и удерживание ДО в этом целевом множестве путем периодического прогнозирования решения на заданном интервале времени прогнозирования.

Применение математического программирования для задач управления нелинейными ДО привело к большому числу различных алгоритмов, основными чертами которых являются поисковые переборные процедуры возможных решений.

Импликация – основная логическая функция поисковых алгоритмов оптимизации

При построении баз знаний используются лингвистическая связка условных предложений: «если..., то...», соответствующая логической операции – импликация [1].

Конечный автомат в форме алгебраической структуры из импликаций

Поисковые процедуры алгоритмов оптимизации могут быть представлены в форме логической комбинационной структуры или конечного автомата (КА) Милли [1]. Например:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t+1) &= x_1(t) x_2(t) + x_3(t) \\ x_2(t+1) &= x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \\ x_3(t+1) &= x_2(t) x_3(t) \end{aligned} \right\},$$

где каждая строка трактуется как импликация; символ «=» – как задержка или обозначение причинно-следственной связи (справа от символа – посылка, слева от символа – заключение); символ «+» – как сложение по mod2; $x_i(t)$ – i -я компонента вектора ЛП; $x_i(t)x_j(t)$ – конъюнкция из i -й и j -й ЛП.

Приведение конечного автомата к форме линейной последовательностной машины (ЛПМ)

Над объектами, представленными в форме ЛПМ, можно выполнять векторно-матричные операции аналогичные операциям, осуществляемым над объектами линейных систем автоматического управления (САУ). Благодаря арифметическим свойствам ЛФ, которые они проявляют при их представлении в виде алгебраических структур по $\text{mod}2$, оказывается возможным сведение логических задач к арифметическим или подобным арифметическим. Это в общем случае позволяет представлять логические системы как линейные структуры, уравнения которых не содержат конъюнктивных элементов.

Сведение поисковых алгоритмов оптимизации к задаче диагонализации $[0,1]$ матриц ЛПМ

Для логических систем в форме ЛПМ логический вывод представляется как процедура обращения $[0,1]$ -матриц, а принятие решения как многократное повторение этой процедуры при изменении начальных условий.

Процедура заключается в приведении $[0,1]$ -матриц к диагональному виду, чтобы в результате сложения строк этой матрицы по правилам элементарных преобразований по $\text{mod}2$ результирующая матрица имела бы минимальное число ненулевых элементов. Это и есть решение.

Оценка сложности поисковых алгоритмов оптимизации по характеристическим $[0,1]$ матрицам ЛПМ – альтернатива машине Тьюринга

Для изучения свойств алгоритмов требуется некая общая для всех форма представления. Такой общепринятой формой является машина Тьюринга – простое по своей идее устройство, предназначенное для механической реализации вычислительных процедур, но как средство для описания вычисляемых функций малоприспособно, так как не имеет развитого языка, в котором можно явно обращаться к функциям. С другой стороны, ЛПМ является удобной, универсальной формой для оценки сложности различных нетривиальных вычислительных алгоритмов.

Логико-вероятностная интерпретация логических переменных и функций от них

В задачах принятия решений логические переменные (ЛП) как аргументы логических функций (ЛФ) обычно характеризуются (со-

проводятся) набором атрибутивных данных. Главным, а во многих случаях и единственным, атрибутом ЛП является ее вероятность. Однако вычисление вероятностей значений СЛФ с большим числом ЛП может представлять известную трудность. При вычислении вероятностей сложных логических функций (СЛФ) на первом этапе до подстановки численных значений аргументов их аналитические (символьные) представления могут оказаться очень громоздкими, поэтому предложено отказаться от форм символьного представления вероятностей, заменив их комбинаторными.

*Приближенное вычисление вероятностей
сложных логических функций
на основе лексико-графического упорядочения*

Вычисление вероятности СЛФ «в лоб», без предварительных приближенных оценок числа «удерживаемых» членов приведет к неоправданно большим затратам машинного времени или памяти ЭВМ. Поэтому предложен алгоритм, в соответствии с которым элементы ЛФ упорядочивались по некоторому закону. Лексико-графическое упорядочение элементов ЛФ и слагаемых в выражении для ее вероятности дает возможность при проведении вычислений контролировать вычислительный процесс и принимать решение о его прекращении при достижении требуемой точности. Это позволило существенно уменьшить объем вычислений путем «отсечения хвостов», дающих малый вклад в значение вероятности ЛФ [80].

*Принятие решения о значении
управляющего воздействия на динамический объект
по значению его логической переменной (0 или 1)
и ее атрибута – вероятности*

В пространстве состояний (ПС) динамический процесс интерпретируется как рост бинарного дерева (БД). По мере роста БД его узлы попадают в различные области ПС (кластеры). Целью управления является попадание в процессе роста БД одного из узлов в заданный кластер за минимальное число шагов. Строится прогнозирующая модель, с помощью которой в каждом узле БД вычисляется оценка ВС ДО, запоминается и хранится в памяти ЭВМ в течение всего цикла прогнозирования. Управляющее воздействие определяется комбинаторным методом как логическая функция упорядоченного множества узлов БД, а его знак выбирается по значению атрибута – вероятности.

4.5. Применение прямого метода Ляпунова для управления элементами зеркальной системы

Рассмотрена методика аппроксимации оптимального управления приводами элементов ЗС с помощью прямого метода Ляпунова, позволяющая учитывать линейные ограничения на перемещения этих элементов путем добавления в классическую функцию Ляпунова штрафных функций от расстояний до ограничений.

Основной проблемой при слежении РТ за КИР в целевом множестве является предельно малый временной интервал, в течение которого необходимо определить управляющее воздействие. Хорошо разработаны методы управления, основанные на прямом методе Ляпунова, например, метод скоростного градиента и его модификации подробно изложенные в работах А. Л. Фрадкова [73, 74].

Наиболее общие результаты по исследованию устойчивости систем могут быть получены по методу А. М. Ляпунова [81]. При использовании прямого метода Ляпунова исследуемая система описывается дифференциальными уравнениями в форме уравнений первого порядка, полагая, что они записаны для переходного процесса в отклонениях всех переменных вектора состояния $\mathbf{x}$ от их значений в установившемся режиме $\mathbf{x}_g$:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_g, \dot{\mathbf{e}} = \Psi(\mathbf{e}, u, f), \quad (4.10)$$

где $\mathbf{e}$ – ошибка управления; u – управление; f – возмущение; Ψ – функция произвольного вида, удовлетворяющая условию

$$\Psi(\mathbf{e}, u, f) = 0, \text{ при } \mathbf{e} = 0,$$

так как в установившемся состоянии все отклонения и их производные равны нулю.

Чтобы исследовать устойчивость по Ляпунову, необходимо подобрать некоторую знакоопределенную функцию $V(\mathbf{e})$ и вычислить производную по времени от этой функции.

Функция $V(\mathbf{e})$ называется *знакоопределенной* в некоторой области, если она во всех точках этой области в окрестности начала координат сохраняет один и тот же знак и нигде не обращается в нуль, кроме начала координат.

Функция $V(\mathbf{e})$ называется *знакопостоянной*, если она сохраняет один и тот же знак, но может обращаться в нуль не только в начале координат, но и в других точках данной области.

Функция $V(\mathbf{e})$ называется *знакопеременной*, если она в данной области вокруг начала координат может иметь разные знаки.

Теорема Ляпунова об устойчивости систем [81]: если при заданных в форме (4.10) уравнениях системы n -го порядка можно по-

добавить такую знакоопределенную функцию Ляпунова $V(\mathbf{e})$, чтобы ее производная по времени $\dot{W}$ тоже была знакоопределенной (или знакопостоянной), но имела знак, противоположный знаку $V(\mathbf{e})$, то данная система устойчива; при знакоопределенной функции W будет иметь место асимптотическая устойчивость.

Теорема Ляпунова о неустойчивости систем [73]: если при заданных в форме (4.10) уравнениях системы n -го порядка производная по времени от какой-нибудь функции Ляпунова $V(\mathbf{e})$ окажется знакоопределенной, причем сама функция $V(\mathbf{e})$ в какой-нибудь области, примыкающей к началу координат, будет иметь знак, одинаковый со знаком производной $\dot{W}$, то данная система неустойчива.

Замечания к теореме Ляпунова об устойчивости.

1. При заданных в форме (4.10) уравнениях системы выбор функции $V(\mathbf{e})$ неоднозначен, поэтому данная теорема Ляпунова обеспечивает получение достаточных условий устойчивости, которые не всегда будут и необходимыми, то есть при выполнении условий теоремы система наверняка будет устойчивой, но эти условия могут не охватывать всей области устойчивости системы по параметрам.

2. Понятие устойчивости по Ляпунову допускает, что при знакоопределенной функции $V(\mathbf{e})$ производная от нее $\dot{W}$ по времени была не обязательно знакоопределенной или знакопостоянной, а могла быть и тождественно равна нулю. В результате система хотя и не будет асимптотически приближаться к установившемуся состоянию, но все же будет все время в достаточной близости от него.

С точки зрения теории оптимального управления функция Ляпунова $V(\mathbf{e})$ является целевой функцией и в силу своих свойств (знакоопределенной, знакопостоянной) может быть выбрана в виде метрики (расстояния) фазового пространства системы (4.10).

Классическим примером $V(\mathbf{e})$ является квадратичная форма ошибки:

$$V(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e}, \quad (4.11)$$

где $\mathbf{P}$ – положительно определенная матрица весовых коэффициентов.

Найти управление u динамическим объектом, цель управления которого задана целевой функцией (4.11), можно с помощью метода скоростного градиента (МСГ). Суть МСГ состоит в том, чтобы достичь цели управления необходимо u в направлении уменьшения $V(\mathbf{e})$. Однако $V(\mathbf{e})$ не зависит от u , найти такое направление затруднительно. Вместо этого можно уменьшать производную от $V(\mathbf{e})$, чтобы выполнялось неравенство $\dot{V}(\mathbf{e}) \leq 0$, означающее уменьшение $V(\mathbf{e})$.

Для построения алгоритма управления по МСГ необходимо найти производную по времени от целевой функции (4.11):

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{e}}. \quad (4.12)$$

Рассмотрим случай управления линейным ДО при ограничениях на управление. Уравнения ДО имеют вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \mathbf{u}_i \in \left[-\mathbf{u}_i^{\max}, \mathbf{u}_i^{\max} \right], \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m, \quad (4.13)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ – параметры ДО; $\mathbf{x}$ – вектор состояния ДО; $\mathbf{u}$ – вектор управления, компоненты которого ограничены по диапазону.

Тогда (4.12) с учетом (4.13) примет вид:

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} + 2\mathbf{u}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}. \quad (4.14)$$

При ограничениях на управления применяется релейный алгоритм, полученный из следующих условий. Система (4.14) будет устойчива, если $\dot{V}(\mathbf{e}) \leq 0$ для всех t , то есть если:

$$\mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} \leq 0 \quad (4.15)$$

$$2\mathbf{u}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \leq 0. \quad (4.16)$$

Условие (4.17) можно обеспечить, если положить

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}, \quad (4.17)$$

где $\mathbf{Q}$ – положительно определенная матрица (диагональная матрица или приводимая к диагональной) с ненулевыми положительными диагональными элементами $q_{ij} \neq 0$ при $i=j$. Уравнение (4.17) называется уравнением Ляпунова.

Условие (4.16) может быть выполнено для любого t выбором знака $\mathbf{u}$ при постоянной амплитуде $\mathbf{u}^{\max}$, если $\mathbf{u}$ скаляр, и выбором знаков u_i при постоянных амплитудах $u_i^{\max}$, если $\mathbf{u}$ – вектор.

Релейный алгоритм имеет вид:

$$\mathbf{u}_i = -\mathbf{u}_i^{\max} \text{sign}(\beta_{i1}e_1 + \beta_{i2}e_2 + \dots + \beta_{in}e_n), \beta = \mathbf{B}^T \mathbf{P}. \quad (4.18)$$

Следует отметить, что не существует строгого математического алгоритма определения параметров матриц $\mathbf{\Gamma}$ и $\mathbf{P}$.

Для обеспечения устойчивого сопровождения КИР необходимо, чтобы траектория РТ в фазовом пространстве не выходила за линейные ограничения, рассчитываемые из параметров ЗС РТ.

В [82] рассматривалась возможность применения релейного алгоритма управления для аппроксимации эталонных процессов,

полученных методами математического программирования. Данный метод заключался в следующем: рассматривалось движение системы вблизи стационарной точки, методами математического программирования определялся оптимальный закон управления в виде меандра при наличии ограничений. Для него определялись точки переключения, составлялась система алгебраических уравнений, по которым в результате оптимизации находились веса $\mathbf{P}$.

Недостатки такого метода заключаются в следующем:

- для разных начальных условий необходимо находить различные $\mathbf{P}$;
- при управлении возможен неконтролируемый выход компонент вектора состояния за ограничения.

Устранить недостатки данного метода можно введением в $V(e)$ штрафных функций от ограничений.

Рассмотрим задачу управления механическим объектом:

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{F}\mathbf{f}, \mathbf{y} \in R^s, \mathbf{u} \in R^m, \mathbf{f} \in R^p, \quad (4.19)$$

где $\mathbf{y}$ – обобщенные координаты; $\mathbf{u}$ – управление; $\mathbf{f}$ – возмущение; $\mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{C}$ – симметрические матрицы параметров; $\mathbf{B}$ – матрица управления; $\mathbf{F}$ – матрица возмущения.

Объект (4.19) необходимо перевести из начального состояния $\mathbf{x}(t_0) = [\mathbf{y}(t_0); \dot{\mathbf{y}}(t_0)]$ в желаемое $\mathbf{x}_g = [\mathbf{y}_g; \dot{\mathbf{y}}_g]$, за минимальное время при линейных ограничениях на фазовые координаты: $\mathbf{y}^{\max}, \mathbf{y}^{\min}$ – максимальные и минимальные значения обобщенных координат; $v^{\max}, v^{\min}$ – максимальные и минимальные значения обобщенных скоростей; $u^{\max}$ – максимальные по модулю значения управляющих воздействий.

Желаемое состояние может рассматриваться как выход некоторой фиктивной системы:

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{y}}_g + \mathbf{D}\dot{\mathbf{y}}_g + \mathbf{C}\mathbf{y}_g = \mathbf{F}\mathbf{f}^*, \mathbf{y}_g \in R^s, \mathbf{f}^* \in R^p, \quad (4.20)$$

где $\mathbf{f}^*$ – оценка возмущающего воздействия.

Уравнения ДО в отклонениях относительно желаемого состояния $\mathbf{x}_g = [\mathbf{y}_g; \dot{\mathbf{y}}_g]$ имеет вид:

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{C}\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{u}, \mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_g, \mathbf{e} \in R^s, \mathbf{u} \in R^m, \quad (4.21)$$

где $\mathbf{e}$ – векторная ошибка управления по всем обобщенным координатам ДО.

Чтобы применить МСГ необходимо, чтобы уравнения ДО (4.21) были приведены к нормальной форме Коши:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{B}_z\mathbf{u}, \mathbf{z} = [\mathbf{e}; \dot{\mathbf{e}}], \mathbf{z} \in R^{2s}, \mathbf{u} \in R^m. \quad (4.22)$$

Классические функции Ляпунова вида (4.11) как целевые функции не учитывают ограничения. Чтобы ввести ограничения в (4.11), воспользуемся методом штрафных функций, подробно изложенным в [77, 83]. Метод штрафных функций позволяет свести задачу минимизации при ограничениях к задаче минимизации без ограничений добавлением в исходную целевую функцию функций, удовлетворяющих следующим свойствам [77]:

- внутри области фазового пространства, очерченного ограничениями, значение штрафной функции стремиться к нулю;
- при приближении к ограничениям значение штрафной функции увеличивается;
- так как V является метрикой фазового пространства, то и модифицированная V также должна быть метрикой, поэтому штрафные функции должны быть больше или равны нулю при всех значениях состояния системы.

Этим условиям удовлетворяют функции вида:

$$\begin{aligned} G_i^{\max}(y_i) &= \exp\left[\delta_i^y(y_i - y_i^{\max})\right] > 0, \\ G_i^{\min}(y_i) &= \exp\left[\delta_i^y(y_i^{\min} - y_i)\right] > 0, \\ Q_i^{\max}(\dot{y}_i) &= \exp\left[\delta_i^v(\dot{y}_i - v_i^{\max})\right] > 0, \\ Q_i^{\min}(\dot{y}_i) &= \exp\left[\delta_i^v(v_i^{\min} - \dot{y}_i)\right] > 0, \end{aligned} \quad (4.23)$$

где $G_i^{\max}(y_i)$ и $G_i^{\min}(y_i)$ – штрафные функции минимальных и максимальных значений обобщенных координат; $Q_i^{\max}(\dot{y}_i)$ и $Q_i^{\min}(\dot{y}_i)$ – штрафные функции минимальных и максимальных значений обобщенных скоростей; δ_i^y и δ_i^v – положительные весовые коэффициенты.

Для удобства выразим $G_i^{\max}(y_i)$, $G_i^{\min}(y_i)$, $Q_i^{\max}(\dot{y}_i)$ и $Q_i^{\min}(\dot{y}_i)$ через $\mathbf{z}$ и $\mathbf{x}_g$:

$$\begin{aligned} W_i^{\max}(z_i) &= \exp\left[\delta_i^z(z_i + x_{g,i} - x_i^{\max})\right] > 0, \\ W_i^{\min}(z_i) &= \exp\left[\delta_i^z(x_i^{\min} - x_{g,i} - z_i)\right] > 0, \\ \delta^z &= \text{diag}(\delta_1^y, \delta_2^y, \dots, \delta_s^y, \delta_1^v, \delta_2^v, \dots, \delta_s^v), \\ \mathbf{x}^{\max} &= [\mathbf{y}^{\max}; \dot{\mathbf{y}}^{\max}], \quad \mathbf{x}^{\min} = [\mathbf{y}^{\min}; \dot{\mathbf{y}}^{\min}]. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Модифицированная функция Ляпунова имеет вид:

$$V(\mathbf{z}) = \mathbf{z}^T \delta \mathbf{z} + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\max}(z_i) + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\min}(z_i) > 0, \quad (4.25)$$

где δ – положительно определенная матрица коэффициентов.

Найдем производную по времени от (4.25) и учтем (4.24):

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{z}) &= \mathbf{z}^T \left(\mathbf{A}_z^T \delta + \delta \mathbf{A}_z \right) \mathbf{z} + 2\mathbf{u}^T \mathbf{B}_z^T \delta \mathbf{z} + \\ &+ \left(\mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{B}_z \mathbf{u} + \dot{\mathbf{x}}_g \right)^T \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max} - \mathbf{W}^{\min} \right], \\ \mathbf{W}^{\max} &= \left[W_1^{\max}, W_2^{\max}, \dots, W_{2s}^{\max} \right]^T, \\ \mathbf{W}^{\min} &= \left[W_1^{\min}, W_2^{\min}, \dots, W_{2s}^{\min} \right]^T. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Найдем градиент от (4.25) по $\mathbf{u}$:

$$\nabla_{\mathbf{u}} \dot{V}(\mathbf{z}) = \mathbf{B}_z^T \delta \mathbf{z} + \mathbf{B}_z^T \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max} - \mathbf{W}^{\min} \right], \quad (4.27)$$

тогда релейный алгоритм управления будет:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\text{diag}(\mathbf{u}^{\max}) \Psi \left(\mathbf{B}_z^T \delta \mathbf{z} + \mathbf{B}_z^T \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max} - \mathbf{W}^{\min} \right] \right), \\ \Psi(a_1, a_2, \dots, a_m) &= \left[\text{sign}(a_1), \text{sign}(a_2), \dots, \text{sign}(a_{2s}) \right]^T. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Рассмотрим задачу управления дискретным ДО при квантовании по времени с периодом T . Уравнения ДО (4.26) в дискретном виде будут:

$$\mathbf{z}[k+1] = \Lambda_z \mathbf{z}[k] + \mathbf{H}_z \mathbf{u}[k], \quad \mathbf{z} \in R^{2s}, \quad \mathbf{u} \in R^m, \quad (4.29)$$

где k – номер такта.

Модифицированная функция Ляпунова для дискретного ДО имеет вид:

$$V(\mathbf{z}[k]) = \mathbf{z}^T[k] \delta \mathbf{z}[k] + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\max}(z_i[k]) + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\min}(z_i[k]) > 0. \quad (4.30)$$

Рассмотрим первую разность:

$$\begin{aligned} \Delta V(\mathbf{z}[k]) &= \mathbf{z}^T[k] \left(\Lambda_z^T \delta \Lambda_z - \delta \right) \mathbf{z}[k] + \mathbf{u}^T[k] \mathbf{H}_z^T \delta \mathbf{H}_z \mathbf{u}[k] + \\ &+ 2\mathbf{u}^T[k] \mathbf{H}_z^T \delta \Lambda_z \mathbf{z}[k] + \left(\Lambda_z \mathbf{z}[k] + \mathbf{H}_z \mathbf{u}[k] - \mathbf{z}[k] + \mathbf{x}_g[k+1] - \mathbf{x}_g[k] \right)^T \times \\ &\times \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max}(\mathbf{z}[k]) - \mathbf{W}^{\min}(\mathbf{z}[k]) \right]. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Найдем градиент от (33) по $u[k]$:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{u}[k]}(\Delta V(\mathbf{z}[k])) &= 2\mathbf{H}_z^T \delta \mathbf{H}_z \mathbf{u}[k] + 2\mathbf{H}_z^T \delta \Lambda_z \mathbf{z}[k] + \\ &+ \mathbf{H}_z^T \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max}(\mathbf{z}[k]) - \mathbf{W}^{\min}(\mathbf{z}[k]) \right], \end{aligned} \quad (4.32)$$

потребуем наличие минимума скорости убывания $\Delta V(\mathbf{z}[k])$, тогда релейный алгоритм управления будет:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\text{diag}(\mathbf{u}^{\max}) \Psi \left(\left(\mathbf{H}_z^T \delta \mathbf{H}_z \right)^{-1} * \right. \\ &* \mathbf{H}_z^T \left(\delta \Lambda_z \mathbf{z}[k] + 0.5 \delta^z \left[\mathbf{W}^{\max}(\mathbf{z}[k]) - \mathbf{W}^{\min}(\mathbf{z}[k]) \right] \right) \Big), \\ \Psi(a_1, a_2, \dots, a_m) &= \left[\text{sign}(a_1), \text{sign}(a_2), \dots, \text{sign}(a_{2s}) \right]^T. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Необходимо определить коэффициенты δ и δ^z , общее число которых в данном случае равно $4s^2 + s$. Эти коэффициенты, как и в [25], можно определить, записав уравнения для точек переключения оптимальных управлений, рассчитанных другими методами.

Чтобы сократить количество искоемых коэффициентов можно использовать функцию вида:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{e}, \mathbf{e}_v, t) &= \mathbf{e}^T \Delta_e \mathbf{e} + \delta_E E(\mathbf{e}, \mathbf{e}_v) + \\ &+ \sum_{i=1}^s \left[\exp(\delta_i^y \bar{\mathbf{y}}^{\max}) + \exp(\delta_i^y \bar{\mathbf{y}}^{\min}) + \exp(\delta_i^v \bar{\mathbf{v}}^{\min}) + \exp(\delta_i^v \bar{\mathbf{v}}^{\max}) \right] > 0, \end{aligned}$$

где $\mathbf{e}_v = \dot{\mathbf{e}}$ – скорость изменения ошибки управления; Δ_e – диагональная матрица положительных весовых коэффициентов при ошибках наведения; δ_E – весовой коэффициент при полной энергии механической системы; $E(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = 0.5 \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{A} \dot{\mathbf{e}} + 0.5 \mathbf{e}^T \mathbf{C} \mathbf{e}$ – полная энергия системы; $\bar{\mathbf{y}}^{\max}$ – отклонение текущего положения ДО от максимальных значений $\bar{\mathbf{y}}^{\max} = \mathbf{y}_g - \mathbf{y}^{\max} + \mathbf{e}$; $\bar{\mathbf{y}}^{\min} = \mathbf{y}^{\min} - \mathbf{y}_g - \mathbf{e}$ – отклонение текущего положения ДО от минимальных значений $\mathbf{y}^{\min}$; $\mathbf{v}_g = \dot{\mathbf{y}}_g$; $\bar{\mathbf{v}}^{\min} = \mathbf{v}^{\min} - \mathbf{v}_g - \mathbf{e}_v$, $\bar{\mathbf{v}}^{\max} = \mathbf{v}_g - \mathbf{v}^{\max} + \mathbf{e}_v$, δ_i^y , δ_i^v – положительные весовые коэффициенты.

В дискретном виде функция Ляпунова имеет вид:

$$\begin{aligned} V[k] &= \mathbf{e}[k]^T \Delta_e \mathbf{e}[k] + \delta_E E[k] + \\ &+ \sum_{i=1}^s \left[\exp(\delta_i^y \bar{\mathbf{y}}^{\max}[k]) + \exp(\delta_i^y \bar{\mathbf{y}}^{\min}[k]) + \right. \\ &+ \left. \exp(\delta_i^v \bar{\mathbf{v}}^{\min}[k]) + \exp(\delta_i^v \bar{\mathbf{v}}^{\max}[k]) \right] > 0, \end{aligned} \quad (4.34)$$

где k – номер такта.

Уравнения ДО в дискретном виде в нормальной форме Коши имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}[k+1] \\ \mathbf{e}_v[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{e}[k] \\ \mathbf{e}_v[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u}[k],$$

где Λ , $\mathbf{H}$ – матрицы параметров дискретного ДО.

Управление, обеспечивающее минимум $\Delta V[k]$, находится из условия $\nabla_{\mathbf{u}[k]} \Delta V[k] = 0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[k] = & -\text{diag}(\mathbf{u}^{\max}) \text{sign} \left(\left[\mathbf{H}_1^T \Delta_e \mathbf{H}_1 + 0,5\delta_E \mathbf{H}_1^T \mathbf{C} \mathbf{H}_1 + \right. \right. \\ & + 0,5\delta_E \mathbf{H}_2^T \mathbf{A} \mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_1 \Delta_e \mathbf{H}_1^T + 0,5\delta_E \mathbf{H}_1 \mathbf{C} \mathbf{H}_1^T + 0,5\delta_E \mathbf{H}_2 \mathbf{A} \mathbf{H}_2^T \left. \right]^{-1} \times \\ & \times \left(\left[2\mathbf{H}_1^T \Delta_e \Lambda_{11} + \delta_E \mathbf{H}_1^T \mathbf{C} \Lambda_{11} + \delta_E \mathbf{H}_2^T \mathbf{A} \Lambda_{21} \right] \mathbf{e}[k] + \right. \\ & + \left[2\mathbf{H}_1^T \Delta_e \Lambda_{12} + \delta_E \mathbf{H}_1^T \Delta_e \Lambda_{12} + \delta_E \mathbf{H}_2^T \mathbf{A} \Lambda_{22} \right] \mathbf{e}_v[k] + \\ & + \mathbf{H}_1^T \delta^y \left[\exp(\delta^y \bar{y}^{\max}[k]) - \exp(\delta^y \bar{y}^{\min}[k]) \right] + \\ & \left. + \mathbf{H}_2^T \delta^v \left[\exp(\delta^v \bar{v}^{\max}[k]) - \exp(\delta^v \bar{v}^{\min}[k]) \right] \right) \right). \end{aligned} \quad (4.35)$$

Коэффициенты Δ_e определяются как отношение диапазона обобщенной координаты к соответствующей максимально допустимой по модулю ошибке управления $e_i^{\max}$:

$$\begin{aligned} \delta = \text{diag}[\delta_1, \dots, \delta_s], \quad \delta_i = \frac{|y_i^{\max} - y_i^{\min}|}{\delta_{\max} e_i^{\max}}, \\ \delta_{\max} = \max \left(\frac{|y_1^{\max} - y_1^{\min}|}{e_1^{\max}}, \dots, \frac{|y_s^{\max} - y_s^{\min}|}{e_s^{\max}} \right), \end{aligned}$$

δ_E – по качеству переходного процесса с использованием «генетического алгоритма»; δ_i^y и δ_j^v – из погрешности соблюдения ограничений:

$$\delta_i^y = -\frac{\ln(\mathbf{e}^{\max, T} \Delta_e^{\max})}{\frac{\sigma_{y,i}^{\max}}{100\%} |y_i^{\max} - y_i^{\min}|},$$

где $\sigma_{y,i}^{\max}$ – погрешность соблюдения ограничений в процентах от диапазона $|y_i^{\max} - y_i^{\min}|$; $\delta_i^v = -\frac{\ln(e^{\max, T} \Delta e^{\max})}{\frac{\sigma_{v,i}^{\max}}{100\%} [v_i^{\max} - v_i^{\min}]}$ – погрешность соблюдения ограничений в процентах от диапазона.

4.5.1. Моделирование системы позиционирования ГЗ на примере привода азимута

В качестве модели объекта управления выбран привод азимута ГЗ в составе асинхронного двигателя, блока управления им и упрощенной модели механики пространственной металлоконструкции, описывающий ее первый резонансный тон, который существенным образом влияет на качество управления (рис. 4.4).

Последнее можно оценивать методом асимптотических логарифмических частотных характеристик АЛЧХ. Согласно этому методу для системы задается некоторое эквивалентное синусоидальное воздействие, с которым связывается заданная максимальная угловая скорость системы и максимальное угловое ускорение. О качестве судят по тому, как система реагирует при подаче на нее. Очевидно, на выходе управляемой системы будет наблюдаться процесс. Значение определяет скалярную ошибку управления, отношение – коэффициент усиления на контрольной частоте, а α – это фазовое запаздывание. При заданной ошибке управления однозначно определяется. В реальных высокоточных системах требуемые ошибки управления составляют несколько угловых секунд, что приводит к увеличению до нескольких тысяч и более, и характеристика усилителя приближается к релейной.

При заданных параметрах «эквивалентного синуса» контрольная точка на оси частот фиксируется. С другой стороны, на АЛЧХ фиксируется вертикальная асимптота, соответствующая первой механической резонансной частоте, зависящей от свойств механической части ДО. Всплеск амплитуды на частоте для больших антенных установок достигает около 20 дБ. Низкочастотные колебания подобного рода очень энергоемки, и сдвиг в область высоких частот физически не реализуем.

Условия устойчивости системы управления требуют гарантированных запасов величин длины среднечастотного участка. Поэтому стремление улучшить качество управления связано со сдвигом контрольной точки вправо и с уменьшением интервала, но этому препятствуют условия устойчивости. Очевидно, сдвиг контрольной

Рис. 4.4. Имитационная модель системы управления электроприводом наведения главного зеркала РТ

Рис. 4.5. Результаты моделирования системы управления наведением радиотелескопа по углу азимута при разной скорости ветра

точки вправо возможен только за счет демпфирования резонансного всплеска на частоте, а наибольшая эффективность демпфирования достигается, когда управление приобретает релейный характер. Это подтверждает известный факт из теории управления, что оптимальное управление следует искать в классе кусочно-постоянных функций (рис. 4.5).

На упрощенной модели отработаны основные принципы синтеза систем управления ГЗ РТ, созданная модель позволяет дать оценки точности позиционирования ГЗ при наличии нелинейного элемента, ограничивающего управляющий сигнал, а также при ограничениях на фазовые координаты привода, такие как ток и скорость поворота антенны и т. д. Модель ПМК может быть расширена путем увеличения числа масс и упругих связей.

Привод азимута имеет один управляющий вход. Исходя из принципа управления по прямому методу Ляпунова управление ищется в виде:

$$u = -u^{\max} \operatorname{sign} \left(\mathbf{p}_1 \mathbf{z} + \int_t \mathbf{p}_2 \mathbf{z} + \mathbf{B}_z^T \boldsymbol{\delta}^z \left[\mathbf{W}^{\max} - \mathbf{W}^{\min} \right] \right), \quad (4.36)$$

где $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ – векторы коэффициентов обратных связей. Выбор структуры управляющего воздействия обусловлен тем, что матрица объекта $\mathbf{A}_z$ имеет нулевой корень, и определение коэффициентов $\boldsymbol{\delta}$ не может быть выполнено через решение уравнения Ляпунова. Для поиска коэффициентов $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ по качеству переходного процесса использовалась оптимизационная процедура NCD пакета Matlab. Наличие интегратора в законе управления обусловлено необходимостью увеличения астатизма синтезируемой системы с целью более эффективного компенсирования внешнего воздействия.

4.6. Принципы построения динамических моделей возмущающих воздействий

Опыт проектирования и эксплуатации мощных радиотелескопов показывает, что основным фактором, препятствующим точному сопровождению космических объектов, являются возмущения, связанные с ветровыми воздействиями. Ветер воздействует на систему наведения через антенну, которая представляет собой аэродинамический фильтр, преобразующий энергию ветрового потока. Скорость ветра и момент на исполнительной оси связаны соотношением $M(t) = a(t) * v^2(t)$, где $M(t)$ – мгновенное значение момента от ветра на исполнительной оси; $a(t)$ – аэродинамический коэффи-

циент момента; $v^2(t)$ – мгновенное значение скорости ветра. Спектральный анализ результатов натурных испытаний и продувок в аэродинамической трубе показал, что угловые колебания зеркала при воздействии ветра со средней скоростью 10–20 м/с в первом приближении можно представить как результат независимых воздействий статистически среднего ветрового потока и его флуктуации относительно среднего, определяемых атмосферной турбулентностью. Установлено, что переменная составляющая ветрового потока может быть описана экспоненциально-косинусными корреляционными функциями, которым соответствует математическая модель формирующего фильтра стационарного случайного процесса (ССП) с вектором состояния 3-го порядка из двух независимых процессов типа «белый шум».

Ветровые воздействия являются основными нагрузками на АУ, определяющими прочность ее конструкции, выбор мощности приводов наведений и точность работы системы управления в условиях помех.

Моделирование аэроупругих колебаний зеркала на двухступенном ОПУ (по азимуту и углу места) показало результат наложения независимых движений по каждой из координат. Следовательно, угловые движения зеркала аэродинамически не связаны, что позволяет упростить методику моделирования и ограничиться одноступенной моделью.

При угле атаки и скорости ветра амплитуда колебаний составляет ~4".

Для скорости ветра амплитуда азимутальных колебаний АУ составляет ~6", что соизмеримо с натурным значением 4".

ССП хорошо аппроксимируются процессами, имеющими типовые корреляционные функции (КФ):

$$K_i(\delta) = D_i e^{-d_i|\tau|}; \quad (4.39)$$

$$K(\tau) = D e^{-d|\tau|} \left(\cos \beta \tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta |\tau| \right), \quad (4.40)$$

где K_i , D_i – параметры КФ.

Спектральные плотности этих процессов определяются соотношениями

$$S_1(f) = D \cdot \frac{\alpha_1}{\pi(\alpha_1^2 + 4\pi^2 \cdot f^2)}; \quad (4.41)$$

$$S(f) = D \cdot \frac{2\alpha_2(\alpha^2 + \beta^2)}{\pi \left[\left(4\pi^2 f^2 - \alpha_2^2 - \beta^2 \right)^2 + 4\alpha_2^2 \cdot 4\pi^2 f^2 \right]}.$$

Для РТ-70 параметры аэродинамических фильтров были получены в результате продувок моделей РТ в аэродинамической трубе «Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО») и многолетних метеорологических наблюдений ветровой обстановки в районах установки радиотелескопа Евпатория (Крым), Уссурийск.

$$D = 0,06. \quad \alpha_2 = 0,2826,$$

$$\alpha_1 = 0,0465 \quad \beta = 0,4.$$

Система трех дифференциальных уравнений, описывающих фильтр, формирующий стационарный случайный процесс с параметрами КФ в нормальной векторно-матричной форме, имеет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{B}}(t) = \mathbf{A}_{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{B}}(t) + \mathbf{F}_{\mathbf{B}} \times (t)$$

$$\mathbf{y}_{\mathbf{B}}(t) = \mathbf{C}_{\mathbf{B}} \times \mathbf{x}_{\mathbf{B}}(t), \quad (4.42)$$

где $\mathbf{x}_{\mathbf{B}}$ – вектор состояния формирующего фильтра; ξ – вектор «белых шумов» единичной интенсивности; $\mathbf{y}_{\mathbf{B}}$ – выходной вектор ССП ветрового воздействия.

$$\mathbf{A}_{\mathbf{B}} = \begin{vmatrix} -\alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & -2\alpha_4 & -(\alpha_4^2 + \beta_4^2) \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad (4.43)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{B}} = \sigma_r \cdot \begin{vmatrix} \sqrt{\alpha_3} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2\alpha_4(\alpha_4^2 + \beta_4^2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad (4.44)$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{B}} = [1, \quad 0, \quad 1].$$

Модель ветрового воздействия на РТ имеет большое значение при имитационном моделировании пространственной металлоконструкции (ПМК) РТ, а также нагрузок на приводы наведения.

Имитационная модель ветрового воздействия с двумя генераторами шума приведена в Приложении 2.

4.7. Система управления силовыми приводами главного зеркала радиотелескопа РТ–70

Конструктивные характеристики:

1. Полноповоротная конструкция с азимут-угломестной монтировкой Зеркальной системы.

2. Оптическая схема Зеркальной системы – по схеме Несмита.

3. Чувствительный элемент (ЧЭ) радиоприемника – криогенно охлаждаемая многопиксельная матрица болометров (см. рис. 2.13).

4. Пять контуров управления:

- электроприводами азимута и угла места наведения Главного зеркала;

- приводом наведения Контррефлектора;

- щитами (щитовыми) адаптивной отражающей поверхности Главного зеркала;

- плоским (Перескопическим) зеркалом для перенаправления принимаемого потока радиоизлучения на ЧЭ;

- ЧЭ радиоприемника для уменьшения влияния деформаций ЗС на положение фокуса.

5. Управление Контррефлектором, щитами адаптивной отражающей поверхности, Перескопическим зеркалом и ЧЭ радиоприемника осуществляется посредством гексаподов.

6. Каждый щит отражающей поверхности Главного зеркала устанавливается на отдельный гексапод, а сами щиты механически развязаны.

4.7.1. Основные режимы работы системы управления РТ–70 в мм диапазоне

Формально режимы работы РТ для задач астрономии можно разделить на два режима работы:

- для обнаружения КИР и определение его координат;

- для наблюдения за КИР, когда его координаты известны.

В первом случае на заданной несущей частоте радиоприемника путем сканирования элементами ЗС РТ осуществляется поиск КИР в пространстве с накоплением принимаемого сигнала. В результате частотная и временная структуры сигнала разрушаются и остается только факт наличия в пространстве радиоисточника излучения с измеренными угловыми координатами. В этом режиме реализуется процесс автосопровождения, в котором совмещены процессы сканирования, выделения ошибки наведения и управления по угловым координатам приводами ЗС с замыканием обратной связи по этой ошибке.

В случае наблюдения за КИР в радиоприемнике РТ открывается информационный канал, процесс радиоприема осуществляется в ре-

альном времени с детектированием полезного сигнала, его временной и частотной обработкой или записью в долговременную память для исследования тонкой структуры принимаемого сообщения.

Следует особо отметить планируемое использование РТ-70 «Суффа» в режиме интерферометра совместно с космическим орбитальным 10-метровым РТ проекта «Миллиметррон».

«В 1965 году советские ученые Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашев, Г. Б. Шоломицкий предложили независимо регистрировать данные на каждой антенне интерферометра, а потом совместно их обрабатывать, как бы имитируя явление интерференции на компьютере. Это позволяет разносить антенны на сколь угодно большие расстояния. Поэтому метод получил название радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и успешно используется с начала 1970-х годов» [126].

Ширина диаграммы направленности или другими словами угловое разрешение приблизительно для радиоинтерферометра РСДБ можно оценить по формуле:

$$\theta = c / Lf,$$

где c – скорость света; L – расстояние между РТ; f – несущая частота потока радиоизлучения КИР.

Потенциальные точности наведения в указанных режимах нами оцениваются следующими значениями:

1. Позиционирование фокальной оси зеркальной системы в заданное угловое положение. Точность:

1.1. С наземной измерительной системой – 5 угл. сек.

1.2. С инерциальной гироскопической системой ориентации – 3 угл. сек.

1.3. С фотогидом – 2,5 угл. сек.

1.4. С панорамным матричным многопиксельным приемником – 0,25 угл. сек.

2. Слежение за источником радиоизлучения по программе. Точность:

2.1. Без применения в приводах наведения гироскопических датчиков угловых скоростей (ДУС) – 7 угл. сек.

2.2. С применением ДУС – 3 угл. сек.

3. Слежение за источником радиоизлучения по его радиосигналам в режиме «автосопровождение» с применением матричного приемника. Точность: 0,5 угл. сек.

4. Слежение за источником радиоизлучения в комбинированном режиме «программа» + «автосопровождение» с коррекцией статической ошибки наведения. Точность: 0,25 угл. сек.

4.7.2. Передаточная функция зеркальной системы радиотелескопа

Математическая модель зеркальной системы представляется в форме сумматора радиочастиц (РЧ), сфокусированных для точечного космического источника радиоизлучений (КИР) на один пиксель ЧЭ заданных размеров, а для протяженного источника КИР – многопиксельную матрицу ЧЭ – в виде радиоизображения. При этом:

1. Каждый пиксель многопиксельной матрицы ЧЭ представляет собой колебательный контур (см. рис. 2.10).

2. РЧ выбивают из материала ЧЭ электроны с частотой следования импульсов от ударного воздействия РЧ.

3. Число выбитых электронов в единицу времени пропорционально числу РЧ за тот же промежуток времени (квантовый выход).

4. Выбитые электроны в зависимости от применяемых материалов в ЧЭ вызывают в колебательном контуре процесс протекания тока, который в свою очередь стимулирует физические процессы:

- вторичного глобального эмиссионного радиоизлучения (эффект отражения);

- вторичного локального эмиссионного электромагнитного поля (эффект самоиндукции);

- нагревание вещества ЧЭ (эффект поглощения);

- изменение несущей частоты эмиссионного радиоизлучения (эффект Комптона) и др.

5. В зависимости от выбранных физических параметров колебательного контура пикселя – емкости, индуктивности и сопротивления – в контуре проявляются резонансные явления и избирательные свойства узкополосных фильтров подобно тому, как в оптике происходит разделение цветов путем выбора и настройки триады материалов (красный, синий, зеленый) в пикселях телевизионных ПЗС матриц.

6. Полезная информация в принимаемом от КИР радиоизлучении содержится в величинах интервалов между РЧ, поэтому для детектирования ее из колебательного контура пикселя ЧЭ должен быть применен время – импульсный метод демодуляции с синтезом соответствующего радиоприемника.

7. На ЧЭ радиоприемника (многопиксельная матрица болометров) кроме полезного потока РЧ от КИР отрицательно действуют собственные тепловые шумы входных элементов ЗС, фоновые космические шумы, шумы Земли, промышленные шумы, поэтому для повышения отношения мощности полезного сигнала к мощности шума ЧЭ криогенно охлаждаются и защищаются рупорными отражателями.

8. На многопиксельной матрице болометров в радиодиапазоне невозможно визуально определить, на какой пиксель сфокусирован поток от точечного КИР, или на каком участке матрицы находится радиоизображение в случае протяженного КИР, поэтому подобно оптике для радиодиапазона должны быть разработаны средства локализации на матрице ЧЭ областей фокусировки. Например, суммарно-разностный алгоритм сканирования матрицы по четвертям с последующим сравнением уровней сигналов с каждой четверти между собой и определением четверти, на которую сфокусирован поток РЧ от КИР, как было описано выше в разделе.

9. Деформации элементов ЗС отрицательно влияют на ее фокусирующие свойства. Это проявляется в отклонении фокуса ЗС от его теоретического положения, уменьшении мощности принимаемого сигнала и искажении полезной информации. Для уменьшения влияния деформаций ЗС на качество радиосвязи ее зеркала устанавливаются на гексаподы, которые путем сканирования этих зеркал обеспечивают компенсацию расфокусировки, то есть автофокусировку.

4.7.3. Система измерения начального положения (юстировки) координат датчиков СН

Юстировка проводится для положения зеркала в зенит.

1. Угловое положение платформы в наземной (географической) системе координат (ГСК). Начало координат в точке установки цифрового датчика главной обратной связи (ЦДОС) по азимуту. Его привязка к ГСК должна осуществляться оптическим способом.

2. Координаты угломестной (горизонтальной) оси в ГСК. (В качестве измерительных средств подразумевается система лазерных теодолитов, установленных на Земле и измеряющих положение угломестной оси. В этой части измерительная схема совпадает со схемой, предложенной АКЦ ФИАН.)

3. Координаты угломестной оси в системе координат платформы (фотооптическая система измерения деформаций стоек, несущих качающуюся часть ОПУ, приводящих к неучтенным цифровым датчиком главной обратной связи ошибкам по азимуту).

4. Координаты гиросtabilизируемой платформы (ГСП) в наземной (географической) системе координат. (Начало координат в точке, близкой к точке пересечения угломестной оси с перпендикулярной к ней плоскостью, проходящей через фокальную ось ЗС.) В предлагаемой схеме для привязки к ГСК непосредственно на корпусе телескопа устанавливаются жидкостный уровень, материализующий вертикаль места, и электростатический гироскоп (ЭСГ), материализующий

полярную ось. Для повышения точности жидкостного уровня в условиях произвольных углов наведения телескопа уровень можно грубо стабилизировать в плоскости местного горизонта, установив в следящий карданов подвес. ЭСГ устанавливается в следящем кардановом подвесе, обеспечивающем согласование с высокой точностью корпуса гироскопа с его ротором, который при запуске ориентируется параллельно полярной оси, при этом отсчетное направление (полярная ось) моделируется зеркалом на корпусе гироскопа. Существующий ЭСГ разработки ЦНИИ «Электроприбор» обеспечивает высокую точность построения и хранения оси мира: после калибровки длительностью 3–4 суток погрешность хранения не превышает 1–2 дуг. сек. за время 2–3 часа. Измеряемые оптическим способом углы должны быть преобразованы в цифровой код и скорректированы на поправки, вычисляемые по модели систематического ухода ЭСГ, параметры которой определяются по результатам калибровки.

5. Координаты верхнего опорного кольца (ОК) в системе координат ГСП.

6. Координаты верхнего опорного кольца (ОК) в системе координат угломестной оси (требуются в случае отсутствия ГСП).

7. Координаты реперов щитов поверхности главного зеркала в системе координат ОК.

8. Координаты реперов поверхности контррефлектора (КР) в системе координат ОК.

9. Координаты оси поворота КР, параллельной угломестной оси, в системе координат ОК.

10. Координаты оси поворота КР, перпендикулярной угломестной оси, в системе координат ОК.

11. Координаты точки начального отсчета линейного перемещения КР в плоскости, параллельной угломестной оси, в системе координат ОК.

12. Координаты точки начального отсчета линейного перемещения КР в плоскости, перпендикулярной угломестной оси, в системе координат ОК.

13. Координаты точки начального отсчета линейного перемещения КР в направлении фокальной оси в системе координат ОК.

14. Координаты точки начального отсчета линейного перемещения перескопического зеркала (ПЗ) в направлении фокальной оси в системе координат ОК.

15. Координаты начального положения оси углового перемещения ПЗ относительно фокальной оси в системе координат ОК.

16. Координаты начального положения оси ПЗ, перпендикулярной фокальной оси, в системе координат ОК.

17. Координаты точки начального отсчета линейного перемещения вершины перескопического зеркала (ПЗ) в направлении нормали к его поверхности в системе координат ОК.

18. Координаты точек начального отсчета линейных перемещений толкателей актуаторов, перемещающих щиты отражающей поверхности главного зеркала в узлах их стыковки (в местах установки измерительных реперов), в системе координат ОК.

19. Координаты точек установки гироскопических датчиков угловых скоростей (ДУС), ориентированных в начальном положении по осям ГСК, ДУС компонуются в блоки по ортогональным осям, по 3 штуки в каждом. Точками установки блоков ДУС являются:

- две точки по краю главного зеркала на пересечении с фокальной плоскостью, параллельной угломестной оси,
- две точки по краю главного зеркала на пересечении с фокальной плоскостью, перпендикулярной угломестной оси,
- ригель стоек контррефлектора (КР),
- центр тяжести КР,
- центр тяжести главного зеркала,
- центр тяжести основания главного зеркала,
- центр тяжести основания,
- центр тяжести противовеса,
- центр тяжести платформы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долгострой радиотелескопа в Суффе, связанный с развалом СССР, является одной из причин, почему в теперешней России нет инструментов миллиметрового диапазона для исследования космического пространства. Но это только часть причины.

Другим фактором было навязывание рядом ответственных лиц в РАН, Минобрнауки и ФАНО предложений о заморозке работ по Суффе, как не перспективных, требующих больших финансовых затрат и перекрывающих развитие российской астрономической инфраструктуры. В то же время научно и технически обоснованных предложений по созданию новых телескопов не появилось, что и понятно – для их сооружения по территории России в силу астроклиматических и географических условий нет места. Это показал проведенный в 2015 году по инициативе Администрации Президента РФ при участии РАН, Минобрнауки России и ФАНО России конкурс на отборку перспективных астрономических инфраструктурных проектов на 2016–2025 годы. По группе российских мега-проектов с международным участием был отобран проект завершения строительства радиотелескопа РТ–70 мм диапазона. Еще одним фактором торможения процесса явилась бюрократическая неувязка между ведомствами, отвечающими за науку. Сначала между РАН и Минобрнауки, а затем к ним присоединилось ФАНО России. Ни одно из этих ведомств не имело юридически правовых оснований для возложения на них функций головной организации, финансирующей строительство научного объекта за рубежом. Неоднократные обращения в Правительство РФ решить этот вопрос заканчивались выпуском поручений, где предлагалось заинтересованным ведомствам договориться между собой и представить согласованное решение. Чего никогда не происходило. В то же время актуальность создания МРАО «Суффа» была четко обозначена в заявлении Президента РФ В. В. Путина в ходе его официального визита в Узбекистан в декабре 2014 года: «В научно-техническом сотрудничестве наиболее важный проект – сооружение в Узбекистане Международной радиоастрономической обсерватории «Суффа». Она будет оснащена крупнейшим радиотелескопом РТ–70, который позволит осуществлять уникальные научные исследования, в том числе космическую связь. В последующем затем выходе ряда поручений Президента РФ говорилось о необходимости подготовки и утверждения устава МРАО «Суффа» и ее реализации. Тем не менее вопрос сдвинулся с мертвой точки только в 2018 году, когда было создано Министерство науки и высшего образования РФ, а академические институты перешли к нему в подчинение.

Летом 2018 года один из авторов этого отчета имел честь участвовать в совещании у президента РАН академика А. М. Сергеева по вопросу возобновления строительства РТ–70. Все участники совещания, в том числе академики А. М. Сергеев, Г. В. Трубников, Н. С. Кардашев, Г. А. Месяц, член-корреспондент Н. Н. Колачевский и др., поддержали предложение о создании международной обсерватории «Суффа» и начале строительства РТ.

Но чтобы перейти к этапу строительства, необходимо провести ряд работ, связанных с актуализацией проекта. К ним относятся работы по обследованию состояния объекта, корректировке проекта, завершение НИР по разработке современных систем РТ–70. Президент РАН проинформировал совещание о своей поездке по указанию правительства РФ в Узбекистан, встречах с Президентом АН РУз и в Правительстве РУз. Была достигнута договоренность о подготовке и подписании президентами национальных академий в 2018 году дорожной карты на 2018–2019 годы, а также о завершении подготовки, подписании проекта Устава МРАО «Суффа» и проекта Межправпротокола о внесении изменений в Соглашение о создании МРАО «Суффа». Особенностью этих документов стало определение Дирекции МРАО «Суффа» как заказчика всех работ по созданию комплекса МРАО «Суффа». Государственным органом, финансирующим МРАО «Суффа» с российской стороны, является Минобрнауки России, а ФИАН – головной организацией с российской стороны по реализации соглашения. По крайней мере, он будет выполнять эту функцию до начала функционирования Дирекции МРАО «Суффа».

Участники совещания посетили плато Суффа (Узбекистан, 300 км от Ташкента в сторону таджикской границы), на котором как подбитая птица на высоте около 2500 м покоится остов недостроенного радиотелескопа. Посещение было организовано, чтобы убедиться, что еще не все потеряно, что достроить телескоп обойдется дешевле, чем построить заново. Да и место лучше не отыскать.

Среди участников совещания, посетивших Суффу, на фото представлены с российской стороны: президент РАН академик А. М. Сергеев, первый заместитель министра Минобрнауки РФ академик РАН Г. В. Трубников, вице-президент РАН академик Ю. Ю. Балега, директор ФГБУН «Физического института им. П. Н. Лебедева РАН» член-корреспондент РАН Н. Н. Колачевский, заместитель директора Международного департамента Минобрнауки РФ В. М. Смирнов, заместитель руководителя АКЦ ФИАН Ю. Н. Артеменко, главный научный сотрудник ФБГУН «ФИЦ ИПФ РАН» В. Ф. Вдовин, главный научный сотрудник ФБГУН «ИПМаш РАН» В. В. Дубаренко.

От узбекской стороны: президент АН РУз, академик АН РУз Б. С. Юлдашев, вице-президент АН РУз профессор С. З. Мирзаев, руководитель отделения физико-математических и технических наук АН РУз академик АН РУз С. А. Бахрамов, директор Астрономического института АН РУз академик АН РУз Ш. А. Эгамбердиев, директор обсерватории «Суффа» Г. И. Шанин, заведующий лабораторией Физико-технического института АН РУз С. Л. Лутпуллаев.

Участники совещания в целях подтверждения научной значимости и предлагаемых научно-технических решений создаваемого РТ–70 договорились провести в августе 2018 года международное рабочее совещание «Современное состояние и перспективы радиообсерватории на плато Суффа в Узбекистане». Это совещание, для краткости называемое Work Shop, состоялось в конце августа. В нем приняли участие 42 человека, представляющих научные и промышленные организации в области астрономии, создания и эксплуатации РТ из России, Узбекистана, Нидерландов, Китая, а также из Италии в режиме телеконференции. Сопредседателями конференции были вице-президент РАН академик Ю. Ю. Балега и директор Астрономического института АН РУз академик Ш. А. Эганбердиев. Были рассмотрены актуальные научные задачи для РТ–70, технические предложения для достижения необходимых параметров работы в мм диапазоне, исследования астроклимата на плато Суффа, возможные проекты сотрудничества с другими обсерваториями, взаимодействия с космическим проектом «Миллиметрон», особенностях радиотелескопов «Альма» в Чили и создаваемого 110 м РТ в Китае и ряд других вопросов. Участники совещания выразили поддержку проекту МРАО «Суффа» и договорились провести очередной Work Shop осенью 2019 года в Москве.

Одновременно с проведением Work Shop рабочая группа в составе Н. Н. Калачевского, Ю. Н. Артеменко, Г. И Шанина и А. М. Рома-

нова завершила подготовку дорожной карты, которая и была подписана президентами национальных академий 10.10.2018 в ходе официального визита Президента РФ В. В. Путина в Республику Узбекистан.

В наибольшей степени участников совещания, от которых непосредственно зависит принятие решений, интересовал вопрос, какой «бренд» – набор ценностных характеристик – будет иметь уже построенный радиотелескоп, по сравнению с другими работающими радиотелескопами мм диапазона.

В результате обмена мнениями нами сформулированы основные отличия, которые должен иметь РТ–70, выгодно выделяющие его в ряду других РТ с регулируемой поверхностью ГЗ.

Во-первых, щиты отражающей поверхности ГЗ должны быть механически независимы и управляться автономно посредством гексаподов.

Во-вторых, отражающая поверхность ГЗ, образованная щитами, должна перемещаться как твердое тело, сохраняя исходную форму параболоида неизменной.

В-третьих, необходимо признать, что радиоизлучение является потоком незаряженных частиц постоянной массы, испускаемых источником излучения со стартовой скоростью, равной скорости света, и сохраняющих согласно закону Ньютона равномерное прямолинейное движение на неограниченном расстоянии. Электромагнитное поле является другим видом материи, создается зарядами, имеет локальное действие и убывает с увеличением расстояния от источника излучения.

Принадлежность поверхностей щитов только одному параболоиду с фиксированными параметрами при любом положении ГЗ, а не множеству аппроксимирующих параболоидов, вычисляемых в соответствии с принципами гомологии металлоконструкции зеркала, обусловлена несоответствием кривизны поверхности щита, кривизне аппроксимирующего параболоида, в который этот щит нужно вставить. Поверхность аппроксимирующего параболоида со вставленными в него щитами всегда будет иметь вид «черепицы» при свободных углах щитов или сложной статически неопределимой фигуры. При «заневоленных» углах с помощью длинных шпилек необходимую точность можно получить только уменьшением размеров щитов и увеличением их числа. Поэтому отражающая поверхность ГЗ, образованная щитами, должна перемещаться как твердое тело, сохраняя исходную форму параболоида неизменной. А щиты должны быть механически независимы и управляться автономно посредством гексаподов. Такая форма управления поверх-

ностью ГЗ в полноповоротных РТ не имеет аналогов и обеспечивает точность поверхности 0,02 мм. Это и есть «бренд». Лучший из полноповоротных РТ мм радиодиапазона с регулируемой поверхностью LMT (Мексика) обеспечивает точность поверхности 0,075 мм. Для сравнения: GBT (Green Bank, USA) – 0,24 мм, SRT (Sardinia, Italy) – 0,15 мм, Tianma (China) – 0,3 мм.

Принцип гомологии применительно к ГЗ РТ заключается в том, что при проектировании металлоконструкции ГЗ структура и параметры ферменного каркаса подбираются с таким расчетом, чтобы при изменении его углового положения и деформации, вызванных собственным весом, распределялись особым образом, а именно так, чтобы форма отражающей поверхности ГЗ оставалась близкой к параболической.

Основным доводом в пользу гомологии является то, что ее реализация приводит к уменьшению длины хода штоков актуаторов на краях ГЗ. Однако конечно-элементные расчеты CAD моделей РТ–70 на Ansys в СПбГПУ показали, что деформации конструкции не превышают 70 мм, в то время как деформации на GBT превышают 500 мм, на SRT – 30 мм. На РТ «Суффа» может быть реализован принцип автономного регулирования щитов с помощью гексаподов, который обеспечивает наивысшую точность приближения поверхности ГЗ к теоретической при сравнительно допустимых величинах (100 мм) хода штоков актуаторов.

Возможность ухода от использования принципа гомологии к ГЗ РТ, а следовательно, и построения аппроксимирующих параболоидов и связанных с этим большим количеством измерений, вычислений, управлением и движением щитов и КР появляется при замене металлоконструкций ГЗ РТ на углепластиковые. Подобная конструкция ГЗ, КР и щитов из углепластика реализуется в настоящее время при создании 110 м РТ в Китае. Об этом китайские ученые рассказали на Work Shop по Суффе в августе 2018 года. Современные достижения в материаловедении и технологии позволяют создавать значительно более легкие и достаточно долговечные конструкции, обладающие заранее рассчитанными параметрами, снижающими гравитационные, температурные и ветровые деформации. На этих конструкциях практически без снижения их характеристик можно установить закладные элементы для средств контроля, адаптации, силовых и информационных кабелей. Щиты отражающей поверхности ГЗ в этом случае следует делать больших размеров, как на LMT в Мексике. Изготовление элементов каркаса ГЗ, КР и щитов из углепластика может осуществляться в России, а их укрупнение и юстировка перед монтажом на РТ–70 могут проходить на Суффе

в уже построенном монтажно-испытательном корпусе с большим по габаритам залом. Кроме того, по внешнему контуру ГЗ РТ следует установить из легкого светоотражающего материала в виде пленки или щитов защитный экран от солнечного нагрева, выдерживающего ветровую, дождевую и снеговую нагрузку. При этом для сохранения равномерной температуры по конструкциям ферменного каркаса ГЗ и внутренней поверхности щитов достаточно будет перемешивать воздух в пространстве между экраном и щитами с помощью вентиляторов. Использование новых материалов и технологий при изготовлении ГЗ РТ снизит затраты на изготовление и монтаж оборудования и ускорит сроки создания РТ–70.

Представление радиоизлучения в форме потока радиочастиц (корпускул) имеет очевидные преимущества в том смысле, что радиоизлучение в мм диапазоне можно сравнивать или находить аналогии излучению в оптическом диапазоне и использовать накопленный в оптике арсенал средств в устройствах радиодиапазона.

Перспективными, на наш взгляд, являются модели корпускулярной системы радиосвязи, в которых сложные процессы электромагнитного взаимодействия полей с веществом заменяются импульсными взаимодействиями корпускул с веществом в виде осцилляторов с последующей время-импульсной демодуляцией полезного сигнала в цифровых радиоприемниках нового типа.

В системах управления приводами следует отметить одну существенную особенность. Она заключается в том, что в прямой цепи управления электродвигателем всегда существует усилительное звено, выходной сигнал которого имеет ограничение. Если не учитывать эту нелинейность, то синтезированная система управления будет либо физически нереализуемой, либо функционирующей в узкой зоне фазового пространства. Процессы оптимального управления всегда связаны с выходом компонент вектора состояния и управляющего воздействия на ограничения. Поэтому в настоящей работе рассмотрена система управления, в которой управляющее воздействие принимает только два предельных значения со знаком + или -. При этом численно исследованы два алгоритма управления. Первый связан с поиском весов квадратичного функционала, обеспечивающего качество переходного процесса по управляющему и возмущающему воздействиям по заданным параметрам при условии, что оно принимает только два предельных значения. Второй алгоритм связан с поиском коэффициентов обратных связей по разности текущего и желаемого состояний объекта управления при ограничениях на управление и вектор состояния.

Оба алгоритма дали схожие результаты. Система управления позволяет путем автофокусировки элементов зеркальной системы РТ с применением лазерных, гироскопических, оптических средств измерений и вычислений обеспечить в режиме наблюдения КО на частоте 300 ГГц следующие параметры:

- точность наведения электрической оси ЗС – 3 угл. сек.;
- точность поверхности главного зеркала 0,02 мм;
- чувствительность радиоприемника к потоку радиоизлучения – 10^{-30} ват/м² Гц.

Рассмотренные выше предложения по улучшению конструкции и систем РТ–70 являются основой для выполнения научно-исследовательских работ по разработке современных систем комплекса МРАО «Суффа» мм диапазона в рамках актуализации проекта, что предусмотрено дорожной картой по созданию МРАО «Суффа». Эти работы должны быть выполнены в течение 2019–2020 годов и завершены разработкой проектов технических заданий на ОКР и изготовление систем и агрегатов радиотелескопа РТ–70. Финансирование на ОКР на РТ–70 будет происходить по смете стройки МРАО «Суффа» через дирекцию МРАО «Суффа», как заказчика по созданию всего комплекса, что и предусмотрено в проекте Устава МРАО «Суффа» и проекте Межправпротокола о внесении изменений в Соглашение о создании МРАО «Суффа».

«Реанимирование» радиотелескопа РТ–70 «Суффа» с регулируемой поверхностью главного зеркала и создание на его базе Международной радиоастрономической обсерватории позволит России и Узбекистану ликвидировать отставание от ведущих стран мира в фундаментальных исследованиях и освоении космического пространства в мм диапазоне радиоизлучений и даже выйти вперед за счет оригинальных технических и научных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю., Артеменко Ю. Н. Радиотелескопы. СПб.: Политехнический ун-т, 2014. 484 с.
2. Dubarenco V., Korniyushin A., Kurbanov V. Automatic Control Panel Module SEMS // Smart Electromechanical Systems. Group. Interaction. Springer International Publishing. 2018.
3. Karcher H., Wander K., Suess M. Pointing Control Through Flexible Body Compensation // MAN Technologie AG, 17–24 August, 2002, Maastricht.
4. Егоров Ю. Г., Смирнов С. В. Ошибки ориентирования зеркальной системы радиотелескопа // Тр. XXXI академических чтений по космонавтике / Под общей ред. А. К. Медведевой. М.: Комиссия РАН, 2007. С. 313.
5. Егоров Ю. Г., Смирнов С. В. Конструкция и основные характеристики инерциальной системы ориентации зеркальной системы радиотелескопа // Тр. XXXI академических чтений по космонавтике / Под общей ред. А. К. Медведевой. М.: Комиссия РАН, 2007. С. 313–314.
6. Егоров Ю. Г. Способ выставки и калибровки инерциальной навигационной системы. АС СССР № 18299577, 1992.
7. Проблемы наведения радиотелескопов на источники радиоизлучений: материалы Всероссийской астрономической конференции 2017 (ВАК–2017). 17–22 сентября 2017 / В. В. Дубаренко, А. Е. Городецкий, А. Ю. Кучмин, Ю. Н. Артеменко. Ялта, 2017.
8. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю., Артеменко Ю. Н. Автофокусировка зеркальной системы радиотелескопа: материалы 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ–2017). Т. 2. Дивноморское, Геленджик, Ростов-на-Дону, Таганрог / Южный федеральный университет. 11–16 сентября 2017, при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-08–20458-Г.
9. Дубаренко В. В., Коновалов А. С., Кучмин А. Ю. Математические модели механических систем как объектов управления: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2007. 188 с.
10. Система автоматического наведения радиотелескопа / Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко и др. Патент на изобретение (заявка № 2006125897) ФИПС от 03.07.2007.
11. Архипов М. Ю., Теплов П. П., Кузнецов Д. А. К вопросу о численном моделировании динамики конструкции космического аппарата «СПЕКТР-Р» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 3 (24)б. С. 96–99.
12. Бахрах Л. Д., Галимов Г. К. Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета. М.: Наука, 1981. 300 с.

13. *Виноградов И. С.* Радиационное охлаждение зеркала крупногабаритного космического телескопа // Радиоастрономическая техника и методы. Тр. ФИАН. Т. 228. М., 2000.

14. *Воскресенский Д. И., Кнашенков А. И.* Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.

15. Современные проблемы построения зеркальных антенн / М. А. Гурбанязов, А. Н. Козлов, В. Б. Тарасов; отв. ред. Л. Д. Бахрах // АН Туркменистана, науч.-производ. объединение «Солнце», ин-т математики и механики. Ашхабад: Ылым, 1992. 416 с.

16. *Калачев П. Д., Дьячков В. Е.* Исследование упругих свойств полноповоротной параболической антенны радиотелескопа // Радиотелескопы. Субмиллиметровые и рентгеновские телескопы: Тр. ФИАН. Т. 77. М.: Наука, 1974.

17. *Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г.* Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.

18. Управление электроприводом радиотелескопа с использованием упрощенного наблюдателя / Г. Г. Соколовский [и др.] // Изв. ЛЭТИ: сб. научн. трудов. Л., 1984. Вып. 344. С. 23–33.

19. *Белянский П. В., Сергеев Б. Г.* Управление наземными антеннами и радиотелескопами. М.: Советское радио, 1980. 279 с.

20. *Поляк В. С.* Эволюция разработки прецизионных конструкций радиотелескопов для радиоастрономии, дальней и спутниковой космической связи. М.: ПГС, 2005. № 5. С. 14.

21. *Dubarenko V.* Increasing guidance accuracy problems for large gabarits antennas // The Third International Conference on Problems of Physical Metrology FIZMET'98. Abstracts. SPb., 1998.

22. *Смоленцев Н. К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. С. 304.

23. *Lacasse R.* Green Bank telescope active surface system. Tech. Rep., NRAO, Kona, HI, USA, 1998. View at Google Scholar.

24. Observing with the Green Bank Telescope / D. Balser, J. Braatz, D. Frayer et al., NRAO, USA, 2015.

25. Active Surface Compensation for Large Radio Telescope Antennas. Congsi Wang, Haihua Li, Kang Ying, Qian Xu, Na Wang, Baoyan Duan, Wei Gao, Lan Xiao, Yuhu Duan // International Journal of Antennas and Propagation. Vol. 2018, Article ID 3903412. 17 p.

26. *Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.* Голографическая интерферометрия: монография. М.: Наука, 1977.

27. URL: mrmarker.ru/p/page.php?id=17863 (Взаимодействие излучения с веществом) (дата обращения: 20.02.2019).

28. URL: teachmen.ru/work/interaction/ (Взаимодействие излучения с веществом) (дата обращения: 20.02.2019).

29. ANSYS theory reference. Eleventh edition. SAS IP, Inc. 2001.
30. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1167669> (Флюенс) (дата обращения: 20.02.2019).
31. Дьяконов В. П. Справочник по применению системы PC MatLAB. М.: Наука, 1993.
32. Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. М.: Физматлит, 2007. 584 с.
33. URL: portal.tpu.ru/SHARED/k/KONVAL/Sites/Russian_sites/ComplexN/008.htm (дата обращения: 20.02.2019).
34. System Identification and Adaptive Control. Theory and Applications of the Neurofuzzy and Fuzzy Cognitive Network Models / Y. Boutalis, D. Theodoridis, T. Kottas, M. Christodoulou. Springer, 2014. 313 p.
35. Wang Y. Design of active surface adjustment system for large radio telescope. Radio Engineering. 2010. Vol. 40. N 3. P. 36–38.
36. The architecture of the active surface control system of the large millimeter telescope // Proceedings Vol. 9151, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation / K. Souccar, G. Wallace, R. Grosslein, F. Schloerb. Montréal, Quebec, Canada, July 2014. View at Google Scholar. View at Scopus.
37. Metrology and surface adjustment of primary reflector panels on the LMT // Proceedings Vol. 9151, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation / M. Alvarez, C. Torres, E. Rios et al. Montréal, Quebec, Canada, July 2014. View at Publisher. View at Google Scholar. View at Scopus.
38. The active surface system on the Noto radio telescope // Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium / A. Orfei, M. Morsiani, G. Zacchiroli et al. Bonn, 2002. P. 13–16.
39. The panels for primary and secondary mirror reflectors and the active surface system for the new Sardinia radio telescope. Memorie Della Societa Astronomica Italiana / G. Zacchiroli, F. Fiacchi, G. Maccaferri et al. Vol. 10. P. 126–130, 2006.
40. Cenacchi E., SRT Project Book, the Istituto di Radioastronomia di Bologna, the Cagliari Observatory (Cagliari) and the Arcetri Astrophysical Observatory (Florence), Italy, 2007.
41. Jin C., Wei F., Li J., Wang H. Principle and application of precision forming for panel of 65m radio telescope. Chinese Journal of Radio Science. 2015. Vol. 30. N 1. P. 1–7.
42. Mahajan, Virendra (1983). Strehl ratio for primary aberrations in terms of their aberration variance. J. Opt. Soc. Am. T. 73 (6): 860–861, doi:10.1364/JOSA. 73. 000860.

43. Боровков А. И., Шевченко Д. В. Конечно-элементное исследование пространственного деформированного состояния радиотелескопа РТ–70, возникающего под действием гравитационных сил // Материалы VIII Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». СПб.: СПбГПУ, 2004. С. 198.

44. Compensation of Deviations from Homology Of Rt–70 Radio Telescope Main Mirrors / G. Olskaya, A. Bondarev, A. Mozgov, V. Gimmelman / Jsc Special Mechanical Engineering Design Office. 2007. № 3.

45. URL: <http://www.dissercat.com/content/nelineinaya-dinamika-slozhnykh-elektromekhanicheskikh-sistem-kak-obektov-upravleniya> (Докторская диссертация В. В. Дубаренко) (дата обращения: 20.02.2019).

46. Белов М. В. Синтез конструкции и закона юстировки управляемой составной поверхностью параболоида главного рефлектора большого радиотелескопа // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5.

47. Белов М. В. Система управления составной поверхностью главного зеркала радиотелескопа, функционирующая на основе мультиагентных технологий // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 8.

48. Нечаев А. И., Иванов В. О., Гиммельман В. Г. Телеметрическая система контроля адаптивной поверхности главного зеркала радиотелескопа РТ–70 Суффа. Всероссийская радиоастрономическая конференция, ВРК–2011. Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии. Санкт-Петербург, 17–21 октября 2011 г.

49. Нечаев А. И., Иванов В. О., Гиммельман В. Г. Телеметрическая система контроля адаптивной поверхности главного зеркала радиотелескопа РТ–70 Суффа // Тр. ИПА РАН 2012. Вып. 24. С. 128–133.

50. Kuchmin A., Dubarenko V. Definition of a rigidity of a hexapod / Smart Electromechanical Systems; Edited by A. Gorodetskiy. Springer, 2016.

51. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа / Ю. Н. Артеменко, В. А. Агапов, В. В. Дубаренко, А. Ю. Кучмин // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 2–9.

52. Dubarenko V., Korniyushin A., Kurbanov V. Automatic Control Panel Module SEMS / Smart Electromechanical Systems. Group. Interaction / Springer International Publishing. 2018.

53. Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications. Springer, 2011. 705 p.

54. Первушин В. Ф. О непараметрической идентификации линейных динамических объектов // Вестник Томского государственного

университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 4 (25). С. 95–104.

55. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. 1974. Вып. 1. 406 с.

56. Ершов А. А. Стабильные методы оценивания параметров (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1978. № 8. С. 66–100.

57. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.

58. Ходасевич Г. Б. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ. Ч. 2. Обработка многомерных данных. СПб.: СПбГТУ, 2002. 250 с.

59. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1999.

60. Дубров А. М., Мхитарян В. С., Трошин Л. И. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика, 1998.

61. Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М.: Наука, 1983.

62. Бочканов С., Краснояров О. Преобразование Фурье и его свойства. URL: <http://alglib.sources.ru/fft/fourier.php> (дата обращения: 12.05.2018).

63. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

64. Gorodetskiy A. Smart Electromechanical Systems. Springer International Publishing, 2016. 277 p.

65. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005 С. 304.

66. Louis A. K., Maab P., Rieder A. Wavelet Theory and Applications. John Wiley & Sons Press, Chichester, 1997.

67. Gorodetskiy A. Kurbanov V. Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Springer International Publishing, 2017. 266 p.

68. Kuchmin A., Dubarenko V. Definition of a Rigidity of a Hexapod. Smart Electromechanical Systems. Springer International Publishing, 2016. 277 p.

69. Кучмин А. Ю. Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3 (70). С. 30–39.

70. Коняхин И. А., Усик А. А. Исследование многоматричной оптико-электронной системы контроля элементов радиотелескопа РТ–70 Суффа // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 70–73.

71. Система автоматического наведения на максимум радиосигнала / Дубаренко В. В. [и др.]. Авторское свидетельство (заявка № 1108884). Гос. Комитет СССР по делам изобретений и открытий, приоритет от 10 августа 1982 г.

72. URL: <http://spacegid.com/elementarnyie-chastitsyi.html#ixzz5eUEqqPiу> (дата обращения: 20.02.2019).

73. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Идентификация сложных механических систем как объектов управления // Региональный вестник молодых ученых: сб. статей. М., 2006. № 2. С. 7–9.

74. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.

75. Etter D. Solving engineering problems using MATLAB. Prentice-Hall, 1993, 434p.

76. Туркин Д. Н., Постников Ю. В. Повышение точности наведения радиотелескопа при действии ветрового момента // II Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Серия «Наука и образование». СПб., 2009. Вып. 1. С. 43–46.

77. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В. Логическое управление в кластерном пространстве состояний динамических объектов // Тр. международной конференции «Интеллектуальные системы и информационные технологии управления, ИСИТУ–2000-IS&ITC». Псков, 2000.

78. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Оценка комбинаторной сложности логических систем управления // Заваляшинские чтения'07. СПб.: ГУАП, 2007. С. 93–96.

79. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г. Импликационное управление динамическими объектами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. № 4. С. 56–61.

80. Моделирование респиччатого аппарата мерцательных клеток / Д. С. Алексеев, Е. И. Баду, А. Е. Городецкий и др. // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. № 2. С. 60–72.

81. Громыко В. Д., Санковский Е. А. Самонастраивающиеся системы с моделью. М.: Энергия, 1974. 80 с.

82. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование / Пер. с англ. М.: Наука, 1975. 280 с.

83. Gorodetskiy A., Dubarenko V. Binary Trees in State Space of Dynamic Control Objects // First International Conferense on Problems of Dynamic Objects Logic. Linguistic Control DOLLC'97. Spb., 1997.

84. Y. Wang. Design of active surface adjustment system for large radio telescope. Radio Engineering. 2010. Vol. 40. N 3. P. 36–38.

85. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона

с адаптивной зеркальной системой // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 14–19.

86. *Chiu S.* Fuzzy Model Identification Based On Cluster Estimation // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 1994. Vol. 2. N 3.

87. Управление в условиях неопределенности / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. Е. Городецкого. СПб., 2002. 398 с.

88. *Кучмин А. Ю.* Проблемы логического управления динамическими объектами в реальном времени // Сб. трудов восьмой научной сессии аспирантов и соискателей ГУАП. СПб., 2005. С. 306–310.

89. *Зангвилл У. И.* Нелинейное программирование. Единый подход / Пер. с англ.; под ред. Е. Г. Гольштейна. М.: Советское радио, 1973. 312 с.

90. *Лорьер Ж. Л.* Системы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1991. 566 с.

91. *Полак Э.* Численные методы оптимизации. Единый подход. М.: Наука, 1974.

92. *Гантмахер Ф. Р.* Теория матриц. М., 1967. 567 с.

93. *Юдин Д. Б.* Вычислительные методы теории принятия решений. М.: Наука, 1989. 320 с.

94. *Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г.* Линейное программирование. М.: Наука, 1969.

95. *Квакернаак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.

96. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. 224 с.

97. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976.

98. *Ли Э. Б., Маркус Л.* Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972.

99. *Беллман Р., Калаба Р.* Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969.

100. *Карманов В. Г.* Математическое программирование. М.: Наука, 1975.

101. *Мальцев А. И.* Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1965. 392 с.

102. *Гасфилд Д.* Строки, деревья и последовательности в алгоритмах: информатика и вычислительная биология / Пер. с англ. И. В. Романовского. СПб.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2003. 654 с.

103. *Городецкий А. Е., Дубаренко В. В.* Метрологические характеристики кластерного пространства систем управления динамическими объектами // Физическая метрология / Под ред. А. Е. Городецкого, В. Г. Курбанова. СПб., 2000. 122 с.

104. *Chiu S.* Fuzzy Model Identification Based On Cluster Estimation // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 1994. Vol. 2. N. 3.

105. *Люгер Д. Ф.* Искусственный интеллект: Стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание / Пер. с англ. М., 2003. 864 с.

106. *Кучмин А. Ю.* Проблемы логического управления динамическими объектами в реальном времени // Сб. трудов восьмой научной сессии аспирантов и соискателей. СПб.: ГУАП, 2005. С. 306–310.

107. *Леонов Г. А. Шумафов М. М.* Проблемы стабилизации линейных управляемых систем. СПб., 2002. 308 с.

108. Проблемы создания систем адаптации космических радиотелескопов / Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко и др. // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3. С. 2–8.

109. Анализ динамики систем автоматического управления актуаторами контррефлектора космического радиотелескопа / Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко и др. // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6. С. 2–6.

110. Проблемы обработки и передачи информации в локальной вычислительной сети системы управления радиотелескопа / Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко и др. // Информационно-управляющие системы. 2009. № 4. С. 2–8.

111. Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов / Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, М. С. Дорошенко и др. // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2012. № 1. С. 26–31.

112. Электроприводы системы логического управления положением контррефлектора космического радиотелескопа / А. Е. Городецкий, В. Г. Курбанов, И. Л. Тарасова, А. Ю. Кучмин // Антенны. 2011. № 4. С. 52–55.

113. Структура системы логического управления положением контррефлектора космического радиотелескопа / А. Е. Городецкий, В. Г. Курбанов, И. Л. Тарасова, А. Ю. Кучмин // Антенны. 2011. № 4. С. 56–59.

114. *Кучмин А. Ю.* Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3 (70). С. 3–11.

115. *Дубаренко В. В., Курбанов В. Г., Кучмин А. Ю.* Об одном методе вычисления вероятностей логических функций // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 2–7.

116. *Кучмин А. Ю., Абрамян А. К.* Применение математического программирования для анализа экспериментальных данных // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6 (73). С. 20–28.

117. *Кучмин А. Ю.* Об одном методе нелинейного программирования с произвольными ограничениями // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 2–9.

118. *Кучмин А. Ю.* Моделирование и идентификация сложных механических систем как объектов управления // Вестник молодых ученых. СПб., 2005. С. 47–54.

119. *Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю.* Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона с адаптивной зеркальной системой // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 14–19.

120. *Карabutов Н. Н.* Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур. М.: МГИУ, 2008. 160 с.

121. *Mzyk G.* Combined Parametric-Nonparametric Identification of Block-Oriented Systems. Springer. 2014. 238 p.

122. *Грон Д.* Методы идентификации систем. М.: Мир, 1975. 302 с.

123. *Волкоморов С. В., Каганов Ю. Т., Карпенко А. П.* Моделирование и оптимизация некоторых параллельных механизмов // Информационные технологии. 2010. № 5. С. 1–32.

124. *Фейнман Р.* КЭД – странная теория света и вещества / Пер. с англ. О. Л. Тиходеевой, С. Г. Тиходеева. М.: Наука, 1988. 144 с.

125. *Dubarenko V.* Corpuscular Model of Radio Emission // International Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2016. Vol. 3. N. 1. P. 40–45.

126. *Ахутин А. В.* Вернер Гейзенберг и философия // Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука, 1990. С. 365.

127. *Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д.* Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2000.

128. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. С. 569–588.

129. *Гусинский В. З., Лесючевский В. М., Литманович Ю. А.* Выставка и калибровка инерциальной навигационной системы с многомерной моделью погрешностей инерциальных измерителей / IV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 1997. С. 27–40.

130. *Гусинский В. З., Лесючевский В. М., Литманович Ю. А.* Некоторые вопросы учета систематической составляющей дрейфа неуправляемых гироскопов в инерциальных навигационных системах // Гироскопия и навигация. 1994. № 3. С. 7–13.

131. *Sacek V.* (July 14, 2006), 6.5. Strehl ratio (дата обращения: 20.02.2019).

132. *Чекалова Е. Ф., Осьминина О. В.* Matlab // ГСПК. Санкт-Петербург. 1993.

133. Дьяконов В. П. Справочник по применению системы PC MatLab. М.: Наука, 1993.
134. Егоренков Д. Л., Фрадков А. Л., Харламов В. Ю. Основы математического моделирования с примерами на языке MATLAB. Изд. 2-е, доп.: учеб. пособие / Под ред. А. Л. Фрадкова; БГТУ. СПб., 1996. 192 с.
135. Потемкин В. Г. Система MATLAB: справ. пособие. М., 1997. 350 с.
136. MATLAB. User's Guide. Reference Guide. The Math Works, Inc., 1994.
137. Туркин Д. Н., Постников Ю. В. Разработка структуры и выбор параметров наблюдающего устройства для оценки момента нагрузки, действующего на радиотелескоп // Электротехника. М., 2009. Вып. 8. С. 11–16.
138. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г. Импликационное управление динамическими объектами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. № 4. С. 56–61.
139. URL: <https://elementy.ru/LHC/HEP/SM> (дата обращения: 20.02.2019)
140. https://ru.wikipedia.org/wiki/Корпускулярно-волновой_дуализм (дата обращения: 20.02.2019).
141. Гальцов Д. В. Корпускулярно-волновой дуализм // Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. М., 2003. С. 312.

Радиотелескоп РТ–70 (Антенная установка СМ–214АУ)

1.1. Назначение и принцип построения антенной установки

Антенная установка СМ–214 АУ является составной частью антенного комплекса П–2500 и предназначена для наведения радиолуча в заданном направлении при проведении радиоастрономических и радиофизических исследований в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн.

На основании конструктивных проработок и анализа конструкций крупных зарубежных радиотелескопов для СМ–214 АУ была принята схема опорно-поворотного устройства с азимутально-угломестной монтировкой на шаровом основании и с зеркальной системой, расположенной между А-образными стойками.

Опорно-поворотные устройства с шаровым основанием имеют большую базу для восприятия опрокидывающего момента и позволяют создать достаточно прочное и жесткое поворотное основание (платформу), передающее внешние и весовые нагрузки от зеркальной системы на опорные устройства.

Расположение зеркальной системы между А-образными стойками считается наиболее рациональным для основного зеркала, выполненного по принципу гомологических деформаций.

1.2. Состав и краткие технические характеристики

В комплект антенной установки Ш–214 АУ входят следующие составные части:

- зеркальная система СМ–223;
- опорно-поворотное устройство СМ–214;
- специальные грузопассажирские лифты ПГ–270, ПГ–271, ПГ–272;
- кольцевой резервуар верхнего контура охлаждения радиоаппаратуры;
- система водоохлаждения.

Краткие технические характеристики антенной установки СМ–214 АУ приведены в табл. П1.1.

2. Зеркальная система СМ–223

Зеркальная система СМ–223 является составной частью антенной установки СМ–214АУ и предназначена для переотражения и фокусирования энергии в облучателе в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн.

Таблица П1.1

Наименование	Технические данные	Примечание
Тип монтировки	Азимутальная с взаимно-перпендикулярными осями	
Тип антенны	Двухзеркальная система Грегори	
Эффективная площадь, м ²		
в СМ-диапазоне	2811	
в ДМ-диапазоне	2909	
Диаметр основного зеркала, м	70	
Поверхность основного зеркала	Сплошная, квазипараболическая	
Диаметр вспомогательного зеркала, м	7	
Поверхность вспомогательного зеркала	Сплошная, квазиэллиптическая	
Нулевое положение ЗС по азимуту	Направление на север (0°)	
Исходное положение ЗС по азимуту	Направление на Юг (180°)	
Углы поворота исполнительных осей:		
по азимуту°	±270	
по углу места	от 4°30' до 95°30'	В режиме «полу-автомат» обеспечивается поворот ЗС по углу места до 0°
Отклонение от вертикальности азимутальной оси при ее вращении	4	При скорости ветра до 4 м/с
Взаимное положение азимутальной и угломерной осей, °	90	
Смещение угломерной оси относительно азимутальной, мм	2500	
Максимальная высота от уровня земли, м	86,2	

Продолжение табл. П1.1

Наименование	Технические данные	Примечание
Высота угломестной оси от уровня земли, м	46,36	
Максимальный радиус обметания (по азимуту), м	42,34	
Вес вращающейся части, т	4270	
Расчетные скорости ветра, м/с:		
по прочности	50	
максимальная рабочая	18	
для заштыривания	до 20	
для точной работы	до 10	
Тип электроприводов наведения АУ	Тиристорные электросило- вые следящие, постоянного тока	
Диапазоны скоростей наведе- ния:		
азимут «быстро»	от 30 '/с до 0, 5 '/с	
азимут «медленно»	от 4 '/с до 2, 5 "/с	
угол места «быстро»	от 15 '/с до 0, 5 '/с	
угол места «медленно»	от 1 '/с до 2, 5 "/с	
Режимы наведения	Программное наведение (ПН) Автосопровождение (АС) Синхронное наведение (СН) Ручное наведение (РН)	
Максимальная скорость слеже- ния, '/с:		
– диапазон «медленно»:		
азимут	4	
угол места	1	
– диапазон «быстро»:		
азимут	20	
угол места	10	
Среднеквадратичные ошибки наведения электрической оси ЗС в картинной плоскости при максимальных скоростях слежения в диапазоне мед- ленно в режиме программное наведение при скорости ветра до 10 м/с	Не более 25°	Уско- рение слежения не более 0,005 °/с ²

Продолжение табл. П1.1

Наименование	Технические данные	Примечание
Тип привода перемещения вспомогательного зеркала	Позиционный следящий с релейным режимом управления	
Скорость перемещения вспомогательного зеркала, мм/с:		
привод коррекции	1	Постоянная
привод установки	1	
Максимальная ошибка остановки вспомогательного зеркала приводами перемещения, мм	2	
Источник энергоснабжения	Сеть 3-фазного переменного тока, напряжением 380 ± 38 В, частотой 50 гц	
Установленная мощность электрооборудования, кВт	650	
Обеспечение надежности АУ	Наличие 2 независимых каналов ЗСП наведения по каждой координате и 2 каналов управления приводами вспомогательного зеркала	
Длительность непрерывной работы приводов наведения	Не менее 20 часов в сутки:	
	при ветре до 10 м/сек. с последовательным чередованием работы электроприводов I и II каналов через 10–12 часов;	
	при ветре до 15 м/сек. с последовательным чередованием работы электроприводов I и II канала «быстро» через каждый час, «медленно» через 10–12 часов	
Подъем грузов и обслуживающего персонала к рабочим местам	Грузопассажирские лифты и подъемники	
Гарантийный срок работы.	20 000 часов в течение 10 лет	При условии использования ЗИП

Наименование	Технические данные	Примечание
Климатические условия, при которых обеспечивается работа СПУ	Относительная влажность воздуха до 98% при $t = +20$ °С; пыль, дождь, мокрый снег, гололед, температура воздуха от -40 до $+50$ °С	

Конструктивно зеркальная система представляет собой качающуюся часть антенной установки, которая, поворачиваясь относительно горизонтальной оси, наводится по углу места.

2.1. Состав и технические характеристики зеркальной системы

Зеркальная система СМ–223 состоит из следующих основных частей:

- основания зеркальной системы со стойками вспомогательного зеркала с ригелем;
- основного зеркала;
- вспомогательного зеркала с приводами установки и коррекции;
- аппаратных кабин с облучателями;
- электрооборудования;
- вспомогательных устройств;
- грузоподъемных устройств.

Технические характеристики зеркальной системы приведены в табл. П1.2.

Таблица П1.2

Основные технические характеристики зеркальной системы СМ–223

Наименование	Величина
Тип зеркальной системы	Двухзеркальная по схеме Грегори
Диаметр основного зеркала (D), м	70
Фокусное расстояние основного зеркала (f), м	21
Отношение f/D	0,3
Глубина основного зеркала, м	14,58
Площадь отражающей поверхности основного зеркала, м	4520
Размер панелей отражающей поверхности основного зеркала, м	
длина	2,5

Окончание табл. П1.2

Наименование	Величина
ширина	0,654–1,982
Количество панелей, шт	1188
Диаметр вспомогательного зеркала, м	3
Глубина вспомогательного зеркала, м	0,651
Среднеквадратическое отклонение поверх ности основного зеркала, мм	1,0
Среднеквадратическое отклонение по верхности вспомогательного зеркала, мм	0,45
Способ компенсации весовых деформаций зеркальной системы	Метод фазовой компенсации. Обеспечивается перемещением вспомогательного зеркала
Полезная площадь несъемной аппаратной кабины, м ²	
нижний отсек	28
верхний отсек	28
Полезная площадь съемной аппаратной кабины, м ²	
нижний отсек	18
верхний отсек	10
Расстояние между центрами опор угло-местной оси, м	26,9
Расстояние от угломестной оси до вершины основного зеркала, м	11
Радиус делительной окружности зубчатого сектора, м	16,848
Радиус обметания, м	40
Максимальная скорость ветра, на которую рассчитана прочность зеркальной системы, м/с	50
Масса зеркальной системы, т	1400
в том числе:	
масса основания зеркальной системы	450
масса форменного каркаса	255
масса рабочей обшивки основного зеркала	62,6
масса вспомогательного зеркала	2,3
масса противовесов	480

2.2. Принципы построения и особенности конструкции зеркальной системы

Зеркальная система, выполненная по схеме Грегори, представляет собой систему из двух зеркал – основного и вспомогательного.

Отражающая поверхность основного зеркала (рефлектора) имеет форму квазипарабооида, который образован вращением вокруг фокальной оси кривой, близкой к параболе. Такой профиль отражающей поверхности дает более эффективное распределение уровня радиосигнала по плоскости раскрыва зеркала.

Отражающая поверхность вспомогательного зеркала (контр-рефлектора) имеет форму квазиэллипсоида.

Основное зеркало изготавливается (монтируется и юстируется) при положении зеркальной системы «В ЗЕНИТ». В этом положении может быть обеспечена высокая точность рефлектора, то есть отклонение реальной отражающей поверхности зеркала от теоретической не будут превышать допустимых величин. Однако при наведении антенной установки по углу места основное зеркало изменяет положение в угломестной плоскости, поворачиваясь относительно оси цапф. Этот поворот зеркальной системы вследствие относительного изменения направления силы тяжести вызывает деформацию основного зеркала, смещение вспомогательного зеркала и облучателя. При этом основное зеркало, имеющее большие размеры, претерпевает значительные весовые деформации по сравнению с исходным положением «В ЗЕНИТ». Абсолютная величина этих деформаций (отклонение от теоретического парабооида более чем в 10 раз превышает допустимые для рабочего диапазона длин радиоволн.

Поэтому основное зеркало проектировалось по принципу гомологических деформаций, то есть так, чтобы его отражающая поверхность при наклоне рефлектора от положения «В ЗЕНИТ» до положения «В ГОРИЗОНТ», деформируясь, оставалась поверхностью, близкой к парабооиду вращения. Тогда около точек деформированной поверхности можно построить новый аппроксимирующий параболоид с новым положением фокальной оси и фокусом.

В этом случае имеют значение не абсолютные деформации, а отклонения реальной отражающей поверхности зеркала от аппроксимирующего парабооида. Путем рационального подбора площадей стержней ферменного каркаса основного зеркала удалось добиться того, что эти отклонения не превышают допустимых величин для минимальных рабочих длин волн.

Таким образом, при наведении антенной установки по углу места каждому углу наклона основного зеркала соответствует аппрокси-

мирующий параболоид со своей фокальной осью и фокусным расстоянием, отличным от исходного.

Компенсация изменения фокусного расстояния и положения фокальной оси при наведении по углу места производится автоматически путем линейного и углового перемещения вспомогательного зеркала таким образом, чтобы фазовые искажения в раскрыве, вызываемые этим перемещением, полностью компенсировали фазовые искажения, вызываемые деформацией основного зеркала.

Реализация принципа гомологических деформаций, положенного в основу расчета и проектирования основного зеркала, наложила на конструкцию зеркальной системы (качающейся части) ряд отличительных особенностей:

1. Металлоконструкция качающейся части разделена на основание зеркальной системы и несущую конструкцию рефлектора (ферменный каркас). Отражающая поверхность основного зеркала образована рабочей обшивкой, состоящей из щитов, закрепленных на ферменном каркасе и отъюстированных под заданный параболоид. Эта обшивка не является несущим элементом конструкции.

2. Ферменный каркас основного зеркала, являющийся пространственной стержневой конструкцией в форме тела вращения, опирается на основание зеркальной системы в двух точках, принадлежащих центральной оси симметрии ферменного каркаса. От вращения вокруг этой оси чаша ферменного каркаса удерживается в двух опорных точках на основании зеркальной системы, лежащих в угломестной плоскости. Кроме названных опорных точек, обе пронизывающие друг друга ферменные конструкции не соприкасаются. Благодаря этому, влияние опорных реакций цапф на основное зеркало практически сведено к нулю.

3. Чтобы устранить силовое воздействие на поверхность рефлектора, приводящее к местным деформациям, четыре стойки с ригелем, несущие вспомогательное зеркало, проходят без контакта через рабочую обшивку рефлектора и его ферменный каркас и опираются через промежуточные ферменные опоры на основание зеркальной системы. Эта схема опирания стоек конструкции, поддерживающей вспомогательное зеркало, защищена авторским свидетельством СССР № 372610.

Таковы основные положения, которые, наряду с принципом гомологических деформаций, положены в основу расчета и проектирования зеркальной системы СМ-223.

Имитационная модель системы управления приводом наведения радиотелескопа РТ-70

Современные методы и средства моделирования динамических систем позволяют проводить численные исследования и получать количественные оценки эффективности функционирования моделей этих систем, по которым с большой достоверностью можно судить, как они будут вести себя в естественных условиях.

Основными методами исследования являются методы численного интегрирования линейных и нелинейных СДУ. Проиллюстрируем эти методы на примере модели азимутального привода системы наведения (СН) РТ-70.

Семимассовая схема привода изображена на рис. П2.1. Параметры динамической модели пространственной металлической конструкции (ПМК) РТ-70 даны ниже.

На рис. П2.1 приняты следующие обозначения: 1 – ригель; 2 – масса КР; 3 – отражающая поверхность КР; 4 – фокус КР; 5 – масса стоек КР; 6 – фокус ГЗ; 7 – вертикальная ось; 8 – отражающая поверхность ГЗ; 9 – масса ГЗ; 10 – масса ферменного каркаса; 11 – масса основания; 12 – точка пересечения фокальной оси ГЗ и горизонтальной оси; 13 – горизонтальная ось; 14 – коренной зубчатый обод

Рис. П2.1. Условная схема, поясняющая принципы
построения конструкции РТ

вертикального наведения; 15, 16 – цапфы горизонтальной оси; 17 – платформа; 18 – ЦДОС угла места; 19 – точка коренного зацепления привода угла места; 20, 21 – точки коренного зацепления приводов азимута; 22 – ЦДОС азимута; 23 – шаровой погон; 24 – фундамент.

Вес вращающейся части – 4270 т.

Вес качающейся части – 1400 т.

Транспонированный вектор состояния ПМК в физическом базисе $X'=[\omega', \alpha']$.

$\alpha'=[\alpha_{пл}, \alpha_{ос}, \alpha_{осз}, \alpha_z, \alpha_{окр}, \alpha_{кр}, \alpha_{пр}]$ – углы поворота относительно азимутальной оси соответственно: платформы, основания, основания зеркала, зеркала, основания контррефлектора, контррефлектора, противовесов зеркала относительно оси угла места (рад).

$$\dot{\omega}' = d\alpha'/dt$$

Вектор моментов инерции (кгм*с²/рад)

$$J(1)=0,21e+008;$$

$$J(2)=0,4e+007;$$

$$J(3)=0,9472e+007;$$

$$J(4)=0,16e+008;$$

$$J(5)=0,32e+007;$$

$$J(6)=0,106e+005;$$

$$J(7)=0,47e+007.$$

Вектор жесткостей упругих элементов (кгм/рад)

$$C(1)=0,535e+010;$$

$$C(2)=0,505e+010;$$

$$C(3)=0,8395e+009;$$

$$C(4)=0,228e+010;$$

$$C(5)=0,648e+007;$$

$$C(6)=0,2074e+010;$$

$EE1$ – топологическая матрица (определяет, как между собой связаны моменты инерции ПМК в схеме крутильных колебаний).

$$EE1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$KK1=-EE1'$ – матрица преобразования координат $\Delta\alpha=KK1*\alpha$;

$\Delta\alpha$ – вектор упругих деформаций элементов конструкции ПМК;

$\mathbf{Bio}=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ – транспонированная матрица в системе уравнений движения ПМК, определяющая точку приложения управляющего момента;

$\mathbf{Fvv}=[0 \ 0 \ 0.02 \ 0.9 \ 0.02 \ 0.06 \ 0]$ – транспонированная матрица в системе уравнений движения ПМК, определяющая распределение ветрового момента на элементы конструкции;

$\mathbf{V}$ – матрица форм колебаний, определяющая преобразование главных обобщенных координат в физические координаты $\omega = \mathbf{V}^* \mathbf{z}_1$; $\alpha = \mathbf{V}^* \mathbf{z}_2$, $\dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{z}_1$

$\mathbf{V} =$

$$= \begin{pmatrix} 0.0628 & -0.3780 & -0.3394 & 0.2688 & -0.0049 & -0.0243 & 0.0009 \\ -0.9598 & -0.3780 & -0.2571 & -0.1131 & 0.0085 & 0.0244 & -0.0011 \\ 0.1452 & -0.3780 & -0.1291 & -0.2194 & -0.0687 & 0.1078 & -0.0086 \\ -0.0019 & -0.3780 & 0.7304 & 0.0372 & 0.0056 & -0.0123 & 0.0009 \\ 0.1992 & -0.3780 & -0.2816 & -0.2322 & 0.2220 & 0.0947 & 0.0071 \\ -0.0315 & -0.3780 & -0.3161 & -0.6441 & -0.9725 & 0.9769 & 0.9999 \\ 0.1143 & -0.3780 & -0.2989 & -0.6297 & -0.0148 & -0.1543 & 0.0041 \end{pmatrix}.$$

$\delta = 0.1 * (1/\sqrt{-w(3, 3)})$ – коэффициент демпфирования колебаний;

$\mathbf{Azp}$ – матрица уравнений состояния ПМК в базисе главных обобщенных координат;

$\mathbf{Azp}(1.7, 1.7) = \delta * w$; $\mathbf{Azp}(1.7, 8.14) = w$;

$\mathbf{Azp}(8.14, 1.7) = \mathbf{eye}(7)$; $\mathbf{Azp}(8.14, 8.14) = \mathbf{zeros}(7)$;

$\mathbf{eye}(7)$ – единичная диагональная матрица с размерами [7 на 7];

$\mathbf{zeros}(7)$ – нулевая матрица с размерами [7 на 7];

$\mathbf{Bzp}$ – матрица входа управляющего воздействия;

$\mathbf{Bzp}(1.7, 1) = (\mathbf{V}^*(-1)) * (\mathbf{Jpmk}^*(-1)) * \mathbf{Bio}$

$\mathbf{Bzp}(8.14, 1) = \mathbf{zeros}(7, 1)$;

$\mathbf{Fzp}$ – матрица входа ветрового воздействия;

$\mathbf{Fzp}(1.7, 1) = (\mathbf{V}^*(-1)) * (\mathbf{Jpmk}^*(-1)) * \mathbf{Fvv}$

$\mathbf{Fzp}(8.14, 1) = \mathbf{zeros}(7, 1)$;

$\mathbf{Vzp}$ – матрица преобразования вектора состояния главных координат;

$\mathbf{Z}' = [\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2]$ в вектор физических координат $\mathbf{X}' = [\omega', \alpha']$

$\mathbf{Vzp} = \mathbf{zeros}(14)$

$\mathbf{Vzp}(1.7, 1.7) = \mathbf{V}$

$\mathbf{Vzp}(8.14, 8.14) = \mathbf{V}$;

$\mathbf{BFzp}$ – объединенная матрица внешних воздействий;

$\mathbf{BFzp} = [\mathbf{Bzp}, \mathbf{Fzp}]$;

KD – матрица преобразований вектора перемещений в физическом базисе к вектору угловых деформаций;

KD (1.6, 1.14)=**zeros** (1.6, 1.14)

KD (1:6, 8:14)=**KK1**;

C0 – матрица преобразований вектора перемещений в физическом базисе к скалярной величине перемещения электрической оси (радиооси) антенны:

$$C0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.89 & 0 & 0.11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Параметры формирующего фильтра ветрового воздействия:

$$dxv/dt = Av * xv + Bv * \xi$$

$$yv = Cv * xv,$$

где **xv** – вектор состояния формирующего фильтра ветровой нагрузки

$$Av = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5652 & -0.2399 \\ 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}, Bv = \begin{bmatrix} 0.2156 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3685 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Cv = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Параметры электропривода:

ce = 1.4 В* – коэффициент противо-эдс (сек./рад),

cm = 0.1 – коэффициент момента (кгм/а),

tj = 0.1 – постоянная времени якорной цепи ЭД (с),

rj = 0 – сопротивление якорной цепи ЭД (ом),

mu = 0.01 – коэффициент вязкого трения ЭД (кгм*сек./рад),

kr = 206280 – коэффициент перевода рад в угл. сек. (угл. сек./рад),

k = 50 – коэффициент усиления (В/угл. сек.),

Kw = $k * kr * cm / (ir * (rj * mu + ce * cm))$ – добротность по скорости (% рад/сек.),

Jd = 0.03 – массовый момент инерции ЭД (кгм*сек.²/рад),

h = 0.01 – период квантования (с),

Cr = $2.1 * 10^{10}$ – жесткость редуктора (кгм/рад),

mjur = *Cr* * 0.08 – коэффициент демпфирования редуктора (кгм/ (рад/сек.)),

luft = 5 – люфт (угл. сек.),

C(1) = $2.3 * 10^9$ – эквивалентная жесткость зеркальной системы (кгм/рад),

mju(2) = 0.013 * *C* (1) – эквивалентное демпфирование зеркальной системы (кгм/ (рад/сек.)),

J(2) = $2.1 * 10^7$ – эквивалентный момент инерции платформы (кгм*сек.²/рад),

$J(3) = 3.74 \cdot 10^{-7}$ – эквивалентный момент инерции зеркальной системы (кгм*сек.²)/рад),

$kw = 0.5$ – коэффициент обратной связи по скорости ЭД (В/рад/сек.),

$ki = 0.4$ – коэффициент обратной связи по току ЭД (В/А).

Параметры эквивалентного синусного режима $A \cdot \sin(w \cdot t)$:

режим «медленно»:

максимальная скорость слежения $V = 30$ угл. сек./сек.,

точность $\theta = 3$ угл. сек.,

максимальное ускорение слежения $E = 0.005$ град/сек.²,

максимальная угловая частота управляющего воздействия (контрольная точка ЖЛАХ) $\omega_k = E/V = 0.61$ /сек.,

логарифмический коэффициент усиления системы в контрольной точке

$$H_{\omega_k} = 20 \cdot \lg(V^2 / (E \cdot \theta)) = 80 \text{ Дб},$$

добротность по скорости

$$D_{\omega_k} = \sqrt[4]{2} \cdot V / \theta = \sqrt[4]{2} \cdot 30 / 3 = 14.1 \text{ (рад/сек.) / угл. сек.}$$

Приведенные выше параметры легли в основу имитационных моделей, структурные схемы которых даны на рисунках (рис. П2.2–П2.8).

В численных примерах соблюдаются размерности: ток – амперы, сигналы – вольты, углы – угл. секунды.

Путем имитационного моделирования в вычислительной среде MatLab Simulink исследованы динамические процессы управления приводами наведения РТ–70, полученные с использованием регуляторов, реализующих в реальном времени линейные законы управления относительно квадратичных критериев качества и регуляторов, реализующих алгоритмы логического управления. Имитационная модель содержит два вида математических моделей пространственной металлоконструкции (ПМК) ЗС. В ПМК реализуется 7-массовая матричная модель, а в ПМК1 – упрощенная 2-массовая, включающая в качестве параметров: J_1 – момент инерции платформы; J_z – момент инерции зеркальной системы.

Подбор коэффициентов обратных связей фазовых координат, коэффициентов ПИД-регуляторов и весовых коэффициентов квадратичного функционала Ляпунова осуществлялся посредством оптимизационной программы Matlab NCD [127–132] по заданным показателям переходного процесса на ступенчатое воздействие и среднего квадрата ошибки на случайное (ветровое) воздействие.

Во всех случаях управляющее воздействие ограничивалось введением нелинейного звена Saturation [127–132].

Результаты численных исследований показывают (рис. П2.9–П2.19), что качество динамических процессов при логическом

Рис. П2.2. Имитационная модель автоматического управления радиотелескопа РТ-70

Use Simulink Response Optimization to tune the gains K_p , K_i , K_d of the PID controller block.

Double-click on the signal constraint blocks to view the specifications and push the «Start Optimization» button to optimize the PID gains.

Рис. П2.3. Настройка ПИД регулятора с ограничениями привода

Рис. П2.4. Привод наведения антенны радиотелескопа по азимуту

Рис. П2.5. Электропривод

Рис. П2.6. Редуктор

Рис. П2.7. Математическая модель пространственной металлоконструкции

Рис. П2.8. Пространственная металлоконструкция (ПМК)

Рис. П2.9. Ток ЭД при обработке ветровой нагрузки

Рис. П2.10. Ток ЭД при обработке рассогласования

Рис. П2.11. Скручивание ГЗ относительно платформы

Рис. П2.12. Управляющий сигнал на ЭД

Рис. П2.13. Ошибка наведения при отработке ветровой нагрузки

Рис. П2.14. Обработка рассогласования по углу

Рис. П2.15. Скручивание ГЗ относительно платформы при 7-массовом ПМК

Рис. П2.16. Управляющий сигнал на ЭД

Рис. П2.17. Ток ЭД при отработке рассогласования

Рис. П2.18. Обработка рассогласования при 7-массовом ПМК

Рис. П2.19. Ток ЭД при обработке ветровой нагрузки при 7-массовом ПМК

управлении в 2–2,5 раза выше качества динамических процессов при управлении по методу стационарной обратной связи. Это подтверждает эффективность предложенных методов. Ниже приведены иллюстрации некоторых типовых процессов управления силовыми приводами РТ. Моделирование показывает, что наряду с такими важными характеристиками РТ, как чувствительность, разрешающая способность по угловым координатам, особую роль играет точность наведения изображения источника радиоизлучения на многопиксельную матрицу чувствительного элемента радиоприемника и идентификация этого изображения. При однопиксельном варианте чувствительного элемента реализация радиоприема в мм диапазоне возможна только за счет увеличения раскрыва (апертуры) облучателя, что приводит к потере чувствительности и разрешающей способности зеркальной системы РТ. Точность наведения неразрывно связана с качеством поверхности ЗС главного

зеркала и его регулировкой. В этом смысле для обеспечения наивысшего качества наведения при реализации управления щитами посредством гексаподов, механически не связанных между собой, поверхность главного зеркала должна передвигаться как твердое тело без изменения параметров исходного параболоида, так как щиты считаются недеформируемыми. Управление таким объектом приобретает новую большую, еще никем не реализованную сложность и, соответственно, высшее качество радиопередачи в миллиметровом и ультра-миллиметровом диапазонах.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубаренко Владимир Васильевич

Доктор технических наук, профессор.

Место работы:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург.

Главный научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем (ЛИЭМС), профессор кафедры «Управление и информатика в технических системах» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). С 2001 года является ученым секретарем диссертационного совета Д 002.075.01 при ИПМаш РАН по присвоению ученых степеней кандидата и доктора технических наук. С 2001 по 2019 годы советом проведено более 100 успешных защит диссертаций.

Кучмин Андрей Юрьевич

Кандидат технических наук.

Место работы:

Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург.

Ведущий научный сотрудник Лаборатории интеллектуальных электромеханических систем (ЛИЭМС). С 2016 года является ученым секретарем диссертационного совета Д 002.075.02 при ИПМаш РАН по присвоению ученых степеней кандидата и доктора технических наук.

Артеменко Юрий Николаевич

Кандидат технических наук.

Место работы:

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН), г. Москва.

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ являлся заместителем полномочного представителя Правительства РФ в комитете МРАО «Суффа». В 2017 году назначен заместителем руководителя АКЦ ФИАН по созданию обсерватории «Суффа». С 1990 года по настоящее время является членом дирекции АКЦ и ученого совета. С 2001 по 2014 годы руководил НИР по созданию современных систем радиотелескопа РТ-70 мм диапазона. Создал кооперацию из более 20 организаций, представляющих академическую, вузовскую и отраслевую науку, а также коммерческие инновационные предприятия.

Шишлаков Владислав Федорович

Доктор технических наук, профессор.

Место работы:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Управление в технических системах», заместитель декана факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике. Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Заслуженный профессор ГУАП, ветеран ЛИАП-ГУАП, лауреат премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся достижения в области высшего профессионального образования.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 1	3
Предисловие 2	9
Список аббревиатур и обозначений	19
Введение.....	22
1. Обзор крупных полноповоротных наземных радиотелескопов мм диапазона.....	37
2. Математические модели основных подсистем радиотелескопов	43
2.1. Модель корпускулярной системы приема-передчи радиоизлучений	43
2.1.1. Теория корпускулярной радиосвязи.....	43
2.1.2. Расчет разности длин оптического пути лучей потока радиоизлучений	59
2.1.3. Диаграмма направленности приемной антенны радиотелескопа (ДНА РТ)	71
2.2. Модели зеркальных систем	81
2.2.1. Анализ радиотелескопов с регулируемой поверхностью главного зеркала	81
2.2.2. Система управления регулируемой поверхностью главного зеркала радиотелескопа РТ–70 в мм диапазоне	91
2.3. Модели многозвенных механизмов для управления зеркальной системой.....	105
2.3.1. Математическая модель системы управления гексаподом.....	105
2.3.2. Математическая модель гексапода в структурно-схематической форме.....	111
2.3.3. Адаптивная платформа многозвеного механизма ...	122
3. Проблемы идентификации систем наведения радиотелескопов	133
3.1. Анализ методов идентификации динамических объектов.....	133
3.2. Идентификация и анализ сигналов	145
3.3. Примеры идентификации систем	154
3.3.1. Идентификация параметров гексапода	154
3.3.2. Идентификация координат удаленных космических источников с помощью системы автосопровождения радиотелескопа	161
4. Управление приводами наведения радиотелескопа мм диапазона	164

4.1. Общие принципы построения моделей динамических систем как объектов управления применительно к РТ-70	164
4.2. Концепция повышения качества процессов управления.....	166
4.3. Проблемы логического управления динамическими объектами	171
4.4. Импликационное управление	172
4.5. Применение прямого метода Ляпунова для управления элементами зеркальной системы.....	176
4.5.1. Моделирование системы позиционирования ГЗ на примере привода азимута	184
4.6. Принципы построения динамических моделей возмущающих воздействий	187
4.7. Система управления силовыми приводами главного зеркала радиотелескопа РТ-70	190
4.7.1. Основные режимы работы системы управления РТ-70 в мм диапазоне.....	190
4.7.2. Передаточная функция зеркальной системы радиотелескопа	192
4.7.3. Система измерения начального положения (юстировки) координат датчиков СН	193
Заключение	196
Литература	203
Приложение 1.....	213
Приложение 2.....	221
Сведения об авторах	237

Научное издание

**Дубаренко Владимир Васильевич,
Кумчин Андрей Юрьевич,
Артеменко Юрий Николаевич и др.**

**РАДИОТЕЛЕСКОПЫ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ЗЕРКАЛ**
Монография

Редактор *Е. В. Торопова*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Сдано в набор 11.05.19. Подписано к печати 16.09.19. Формат 60 × 90 1/16.
Усл. печ. л. 14,0. Усл.-изд. л. 14,8. Тираж 500 экз. Заказ № 309.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67