УДК 621.396.677 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.49.54

Обеспечение энергетических характеристик крупногабаритных зеркальных антенн с помощью антенных полей

Д. Д. Габриэльян, д. т. н., профессор, rniirs@rniirs.ru

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

В. И. Демченко, к. т. н., rniirs@rniirs.ru

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

А. Е. Коровкин, rniirs@rniirs.ru

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

А. В. Шипулин, rniirs@rniirs.ru

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Ю. И. Полтавец, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения высоких энергетических характеристик путем замены крупноапертурных антенн антенными полями. Предложено формировать антенное поле на единой конструкции, наклоненной под углом 45° к плоскости горизонта, что обеспечивает сканирование луча в пределах верхней полусферы, использовать опорно-поворотное устройство (ОПУ) каткового типа, позволяющее установить несущую конструкцию антенного поля в требуемом рабочем секторе по углу азимута, и собственные ОПУ, осуществляющие точное наведение каждой зеркальной системы в составе антенного поля по углу места и азимута. Приведен вариант построения антенного поля для системы дальней космической связи на базе семи зеркальных антенн (ЗА) с диаметром рефлектора 12 м, обеспечивающего сканирование луча, формируемого антенным полем в секторе углов, близком к полусфере. Представлены характеристики направленности при сканировании луча в верхней полусфере.

Ключевые слова: крупногабаритная зеркальная антенна, антенно-волноводный тракт, антенное поле

Ensuring Energy Characteristics of Large-Scale Dish Antennas by Antenna Fields

D. D. Gabriel'yan, Dr. Sci. (Engineering), rniirs@rniirs.ru

FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russia

V. I. Demchenko, Cand. Sci. (Engineering), rniirs@rniirs.ru

FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russia

A. E. Korovkin, rniirs@rniirs.ru

FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russia

A. V. Shipulin, rniirs@rniirs.ru

FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russia

Yu. I. Poltavets, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper studies the issues of providing high-energy characteristics by means of changing large aperture antennas with antenna fields. It is offered to form an antenna field on a unified construction declined at the 45° angle to the horizontal plane, which ensures scanning of a ray within the limits of the upper hemisphere. Moreover, the article suggest employing a positioning mount of a roller type allowing erecting a supporting structure of an antenna field in the required operating sector in the azimuth angle. In addition, it is offered to apply own positioning mounts providing accurate pointing of each parabolic system as a part of an antenna field both in elevation and in azimuth.

Keywords: large-scale dish antenna, antenna and waveguide transmission line, antenna field

Крупноапертурные антенные системы с площадью апертуры рефлектора больше 300 м^2 находят применение в различных областях исследования космоса, включая организацию дальней космической связи [1–5]. Создание таких антенных систем в каждом случае сопряжено с необходимостью решения сложных научно-технических и инженерных задач и соответственно значительными материальными и временными затратами.

Основными факторами, определяющими сложность построения таких антенных систем, являются:

- большая площадь и масса зеркальной системы, а также значительный вынос контррефлектора, что обуславливает сложность поддержания требуемой формы зеркальной системы и взаимного положения зеркальной и облучающей систем при сопровождении спутника по углу места. Появляющиеся отклонения формы рефлектора и смещение контррефлектора требуют принятия сложных дорогостоящих мер для исключения снижения коэффициента усиления в Ku - и Ka -диапазонах частот;

- высокая сложность создания опорно-поворотного устройства (ОПУ) (независимо от того, используется ОПУ башенного или каткового типа), которое должно обеспечивать точность наведения зеркальной системы не более $0,1'$ в требуемом диапазоне углов;

- внешние воздействия, включая весовые и ветровые нагрузки, приводящие к колебаниям зеркальной системы, а также градиент температур по поверхности рефлектора, приводящий к искажению его формы.

Указанные сложности реализации крупноапертурных антенн обуславливают во многих случаях использование подхода, связанного с созданием гибридной антенны, представляющей собой совокупность зеркальных антенн (ЗА) с диаметром рефлектора 10–12 м, установленных на общем подвижном основании упрощенной конструкции [1, 3, 4].

Известные варианты построения антенных полей на основе зеркальных антенн, предусматривающие установку антенн в горизонтальной плоскости, имеют ряд недостатков, одним из которых является затенение антенн, размещенных в центре антенного поля, антеннами, установленными по его периметру, которое возникает при сканировании луча антенной системы в секторе углов, близком к полусфере.

Цель статьи — анализ одного из вариантов построения антенного поля системы дальней космической связи на базе зеркальных антенн, обеспечивающего сканирование луча, формируемого антенным полем в секторе углов, близком к полусфере.

Решаемые задачи:

1. Анализ возможности создания антенного поля для замены крупноапертурной антенны с диаметром рефлектора 32 м и более и предложения по его построению.

2. Исследование характеристик направленности, формируемых антенным полем.

Одним из основных требований, предъявляемых к конструкции антенного поля системы дальней космической связи, является возможность сканирования луча в секторе углов, близком к верхней полусфере. Для исключения эффектов взаимного затенения антенн при формировании луча в направлениях, близких к горизонту, предлагается создавать антенное поле, как показано на рис. 1:

- исключение эффектов взаимного затенения при сканировании луча в угломестной плоскости обеспечивается установкой плоскости несущей конструкции антенного поля под углом 45° к плоскости горизонта;

- исключение эффектов взаимного затенения при сканировании луча в азимутальной плоскости обеспечивается возможностью вращения антенного поля путем поворота на катках.

Приведенный на рис. 1 вариант построения соответствует замене 32-метровой зеркальной антенны антенным полем из семи 12-метровых ЗА.

Каждая из семи антенн имеет независимое ОПУ для наведения своей зеркальной системы в требуемом направлении и свой антенно-волноводный тракт. Расстояние между центрами рефлекторов составляет 19,2 м. Это позволяет, с одной стороны, избежать взаимного затенения рефлекторов при малых и больших углах места, а с другой стороны, исключить появление дифракционных лепестков в диаграмме направленности (ДН) всей антенной системы.

На рис. 2 и 3 показано положение рефлекторов в составе антенного поля для углов места 5° и 85° .

В предлагаемой антенной системе наведение максимума ДН по углу азимута осуществляется комбинированным способом:

Рис. 1. Антенное поле на основе семи антенн: а) общий вид; б) вид сбоку

Рис. 2. Конструкция антенной системы (угол места луча 5°): а) общий вид; б) вид сбоку

– с использованием ОПУ каткового типа несущая конструкция антенной системы устанавливается в требуемом рабочем секторе по углу азимута;

– с использованием собственного ОПУ осуществляется точное наведение каждой зеркальной системы по углу места и азимута.

Необходимо указать, что к точности предварительной установки несущей конструкции по углу азимута никаких высоких требований не предъяв-

ляется. В то же время такая предварительная установка позволяет сократить азимутальный сектор перемещения привода каждой зеркальной системы и тем самым упростить построение опорно-поворотного устройства. Плоскость несущей конструкции наклонена под углом 45° к плоскости основания, что позволяет упростить также и угломестный привод и ограничить угловое перемещение рефлектора сектором $(-40^\circ, +40^\circ)$. В целом это дает

Рис. 3. Конструкция антенной системы (угол места луча 85°): а) общий вид; б) вид сбоку Рис. 4. ДН антенной системы (угол места луча 45°): а) в угломестном сечении; б) в азимутальном сечении Рис. 5. ДН антенной системы (угол места луча 5°): а) в угломестном сечении; б) в азимутальном сечении

возможность значительного упрощения угломестно-азимутального привода и повышения точности установки луча.

На рис. 4 и 5 приведены ДН, формируемые данной антенной системой для углов места 45° и 5° соответственно (ДН для угла места 85° будет совпадать с ДН для угла места 5°).

Конструкция 12-метрового рефлектора является жесткой с отсутствием деформаций при изменении угла места. Достигнутые в настоящее время значения среднеквадратичного отклонения (СКО) поверхности рефлектора от эталонной (теоретической) составляют 0,15 мм. Максимальная рабочая частота антенны, при которой КНД антенны остается в заданных пределах с учетом условий эксплуатации, составит 40 ГГц. Необходимо отметить, что в ЗА с рефлектором меньшего размера реализуемое значение коэффициента использования поверхности (КИП) антенн выше по сравнению со значением КИП в крупноапертурных антеннах [5–8].

Одним из вопросов построения предлагаемого варианта антенной системы является совместное фазирование всех семи ЗА, которое заключается в выравнивании фаз излучаемых каждой антенной сигналов относительно одного, например излучаемого четвертой антенной сигнала.

На рис. 6 приведена структурная схема устройства фазирования в режиме передачи сигналов. Для подстройки фазы излучаемых сигналов в тракте передачи каждой антенны установлен направленный ответвитель.

Сигнал проходит через фазосдвигающее устройство и поступает на первый вход соответствующей системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На второй вход подается опорный сигнал с ответвителя четвертой антенны.

Сигнал рассогласования, пропорциональный разности фаз излучаемых сигналов, подается на вход соответствующего генератора, что обеспечивает взаимное фазирование всех семи антенн.

Величина фазового сдвига определяется в устройстве управления антенной системой на основе известного положения зеркальных антенн на несущей конструкции и требуемых углов наведения луча антенной системы.

Выводы

1. Анализ возможности создания антенного поля для замены крупноапертурной антенны с диаметром рефлектора 32 м и более, сканирующей в области верхней полусферы, показал необходимость использования системы ЗА, установленных на общей несущей конструкции, плоскость которой наклонена под углом 45° к плоскости горизонта. Вращение несущей конструкции достигается ее установкой на систему катков, движущихся по рельсовому пути, уложенному по окружности.

Достоинствами предложенной антенной системы являются:

- замена сложного в изготовлении и установке рефлектора диаметром 32 м и более и связанной с ним формообразующей конструкции на семь рефлекторов с диаметром 10–12 м, технология изготовления которых хорошо отработана;

- возможность использования гибридного ОПУ, в котором предварительная установка несущей конструкции антенной системы в рабочем секторе по углу азимута осуществляется с применением ОПУ каткового типа, а точное наведение каждого рефлектора — с использованием отработанного азимутально-угломестного ОПУ. Наклон несущей конструкции под углом 45° к плоскости горизонта позволяет сократить сектор сканирования каждой антенны до $\pm 40^\circ$ относительно нормали к плоскости раскрыва. С учетом данных предложений возможно использование упрощенного азимутально-угломестного ОПУ, что обеспечивает повышение точности наведения луча и снижает стоимость антенной системы;

- обеспечение более высокого значения КИП и отсутствие его снижения из-за искажений формы рефлектора, обусловленных действием весовых нагрузок, при изменении угла места;

- более простое выполнение антенно-волнового тракта с использованием последующего цифрового диаграммообразования;

- более простое выполнение операций при проведении технического обслуживания и эксплуатации.

Сложности реализации заключаются в:

- необходимости использования семи трактов (один тракт для каждой антенны);

Рис. 6. Структурная схема устройства фазирования зеркальных антенн в составе антенной системы

- необходимости дополнительного введения устройства цифрового диаграммообразования.

2. Выполненное исследование диаграммы направленности, формируемой антенным полем из семи 12-метровых ЗА, расстояние между центрами которых составляет 19,2 м, показало, что ДН такого антенного поля полностью соответствует ДН 32-метровой ЗА. При этом общая геометрическая площадь рефлекторов семи 12-метровых ЗА составит 1008 м² против 1024 м² 32-метровой ЗА. С учетом более высокого КИП, реализуемого в 12-метровых антеннах, выигрыш в шумовой добротности при использовании антенного поля по сравнению с 32-метровой ЗА составит 0,7 дБ.

Список литературы

1. Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Саранов А.А. Применение полей зеркальных антенн для построения современных радиотелескопов // Материалы Всероссийской радиоастрономической конференции (ВРК-2014) «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии». 22–26 сентября 2014 г., Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН.
2. Кинбер Б.Е. Двухзеркальная антенна // Радиотехника и электроника, 1962, т. 7. С. 973–981.
3. Williams W.F. High efficiency antenna reflector // Microwave Journal, July, 1965. P. 79–82.
4. Galindo V. Design of dual reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distribution // IEEE Trans. Antennas Propagat, 1964, vol. AP-12. P. 403–408.
5. Демченко В.И., Косогор А.А., Раздоркин Д.Я. Методология разработки многодиапазонных зеркальных антенн // Антенны, 2012, вып. 9(184). С. 4–13.
6. Раздоркин Д.Я., Романенко М.В. Оптимизация облучающих систем многодиапазонных двухзеркальных осесимметричных антенн // Антенны, 2001, вып. 6(61). С. 47–51.
7. Раздоркин Д.Я., Романенко М.В. Алгоритм оптимизации двухзеркальной антенны с рефлектором из параболических щитов // Антенны, 2002, вып. 5(60). С. 44–47.
8. Rao B.L.J., Chen S.N.C. Illumination efficiency of a shaped Cassegrain system // IEEE Trans. Antennas and Propagat (Communications), May 1970, vol. AP-18. P. 411–412.