УДК.621.396.663

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПЕЛЕНГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

**Р.К. Бурносов,
Д.С. Криков, Т.В. Осипова**
АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

Исследованы возможные пути увеличения точности в многоканальных фазовых пеленгационных устройствах за счет компенсации фазовых ошибок каналов при выполнении специальной калибровки. Разработаны новый метод калибровки и алгоритм функционирования. Для подтверждения эффективности предложенного метода проведены имитационное моделирование в среде Simulink и натурный эксперимент на аппаратуре радиомониторинга. Для устранения ошибок, связанных с человеческим фактором, а также для уменьшения времени калибровки разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс калибровки многоканального пеленгационного устройства на основе фазированной антенной решетки.

Ключевые слова: калибровка, пеленгационные устройства, радиомониторинг.

AUTOMATED ITERATIVE METHOD OF CALIBRATION OF A MULTICHANNEL DIRECTION FINDER BASED ON A PHASED ARRAY ANTENNA

**R.K. Burnosov,
D.S. Krikov, T.V. Osipova**
CENTRAL RESEARCH RADIO ENGINEERING
INSTITUTE NAMED AFTER ACADEMICIAN
A.I. BERG

Possible ways of increasing the accuracy in multichannel phase direction finders by compensating for the phase errors of channels during special calibration are investigated. The new method of calibration and the functioning algorithm are developed. The imitation modeling in Simulink and experiment on the radio-monitoring system are provided to confirm the effectiveness of proposed method. The software for automation of calibration of multichannel direction finder based on a phased array antenna is developed for elimination of errors related to the human factor and reducing the time of calibration.

KEYWORDS: calibration, direction finders, radiomonitoring.
DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-4-24-31

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке в Российской Федерации и в г. Москве, в частности, широко используются радиоэлектронные системы (связь, теле- и радиовещание, системы опознавания, навигация, радиолокация и мн. др.). Для обеспечения корректной работы этих систем используются пеленгационные устройства (ПУ). В основном в г. Москве они используются для радиомониторинга и радиоконтроля, т.е. обеспечивают обнаружение и пеленгование источников радиоизлучения, управление использованием радиочастотного спектра. При проведении контртеррористических операций ПУ позволяют выявить источник электромагнитного излучения, создающий угрозу информационной безопасности и утечки информации по радиоканалу. Это является важной задачей при обеспечении безопасности населения города в современных условиях. Также контроль радиообстановки очень важен в районе

аэропортов города для обеспечения безопасности полетов авиации, к примеру, посадка воздушного судна является сложными и ответственными этапом полета, и для его выполнения используется множество радиоэлектронных средств: диспетчерский и посадочный радиолокаторы, глиссальный и курсовой радиомаяки и др. Воздействие преднамеренных или непреднамеренных помех на средства обеспечения полетов приведет к их некорректной работе. ПУ активно используются и в ВС МО РФ как разведывательные средства наземного, воздушного или морского базирования. Это важнейшая информационная составляющая при ведении боевых действий, поскольку использование этих средств приводит к уменьшению потерь как личного состава, так и военной техники.

В реальных условиях работы радиопеленгатора существует целый ряд факторов, ухудшающих его характеристики и вызывающих ошибки в определе-

нии пеленга. Анализ причин этих ошибок и методов их устранения при эксплуатации представляет собой один из важнейших вопросов теории радиопеленгаторов [2–4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день актуальным вопросом при построении многоканальных ПУ остается повышение точности измерения пеленга. Ошибки многоканальных ПУ на основе фазированной антенной решетки имеют как случайный, так и систематический характер.

Случайные ошибки приводят к колебаниям пеленга во времени, причем обычно наблюдаются быстрые, медленные и очень медленные колебания пеленгов. При очень большом числе наблюдений одной и той же станции, взятых за большой промежуток времени, средняя случайная ошибка равна нулю, так как отклонения в одну и в другую сторону равновероятны.

Систематические ошибки вызывают устойчивое отклонение измеренного пеленга от истинного направления на радиоэлектронное средство (РЭС) на определенное значение угла. Они связаны с неидентичностью фазовых характеристик приемных каналов и динамическими фазовыми ошибками приемных каналов. Систематические ошибки принципиально могут быть устранены калибровкой ПУ.

Пример проявления систематических ошибок представлен на рис. 1.

Данные графики были получены на ПУ, установленном на авиационном носителе. На вход антенной решетки устройства поступал сигнал под углом -20° ,

РИС. 1.

Проявление систематических ошибок

мощность которого плавно увеличивалась (график «Мощность»). На выходе ПУ были зафиксированы разности фаз сигнала в зависимости от его мощности (график «Разница фаз сигнала между каналами»). Как видно из этого графика, приемные каналы неидентичны между собой примерно на 10 фазовых градусов, а динамическая фазовая ошибка в данном случае составила примерно 80 фазовых градусов. Фазовые ошибки привели к «отскокам» пеленга (график «Пеленг»).

Классический метод калибровки многоканального ПУ заключается в том, что пилот-сигнал с известными параметрами и постоянной априорной мощностью проходит через приемные каналы устройства, и в пеленгаторе определяются поправочные значения разности фаз, т.е. ошибки приемных каналов. Далее поправочные значения разности фаз используются для компенсации ошибок при определении пеленга в рабочем режиме. Такой метод не позволяет оптимально устранить динамические фазовые ошибки, а в случае значительного отличия мощности пилот-сигнала от оптимального может даже усугубить ситуацию.

В методе предлагается итерационным способом выполнять поиск оптимального значения мощности пилот-сигнала. В качестве основного критерия оптимизации предлагается минимизация относительного количества пеленгов, ошибка измерения которых превышает задаваемое допустимое граничное значение. Таким образом, в данной работе предлагается метод калибровки пеленгатора, который позволяет оптимальным образом компенсировать систематические динамические ошибки приемных каналов. Метод автоматизирован, что обеспечивает выполнение калибровки в короткое время в условиях эксплуатации.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ПЕЛЕНГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

1) Установка источника юстировочного (калибровочного) сигнала (ИЮС) по траверсу к фазовому центру антенной панели. ИЮС в системе координат антенной панели представлен на рис. 2.

2) Загрузка в программное обеспечение данных о местоположении ИЮС и определение расстояния R от ИЮС до фазового центра и пеленга α на ИЮС.

3) Расчет минимальной мощности ИЮС P_{min} соответствующей чувствительности пеленгационного устройства $P_{\text{ч}}$, производится по следующей формуле:

$$P_{min} = P_{\text{ч}} + L_{\text{св.пр.}},$$

где $L_{\text{св.пр.}}$ – ослабление сигнала в свободном пространстве,

$$L_{\text{св.пр.}} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right),$$

где λ – длина волны юстировочного сигнала.

РИС. 2.

Расположение ИЮС относительно антенной панели

Причем, при расчете P_{min} необходимо брать длину волны, соответствующую минимальной частоте сигнала в диапазоне работы ПУ, т.к. при ней будет максимальное ослабление сигнала в свободном пространстве.

4) Расчет максимальной мощности ИЮС P_{max} соответствующей верхней границе динамического диапазона ПУ $P_{\Delta\Delta}$ производится по следующей формуле:

$$P_{max} = P_{\text{ч}} + P_{\Delta\Delta} + L_{\text{св.пр.}}$$

При расчете P_{max} необходимо брать длину волны, соответствующую максимальной частоте в диапазоне работы ПУ, т.к. при ней будет минимальное ослабление сигнала в свободном пространстве.

5) По команде от программного обеспечения ИЮС осуществляет сканирование с шагом ΔF в диапазоне рабочих частот ПУ на мощностях от P_{min} до P_{max} с шагом 1 дБ.

6) Определение оптимальной мощности $P_{\text{опт}}$ для проведения калибровки осуществляется следующим образом:

- для каждой мощности от P_{min} до P_{max} определяется относительное количество ошибочных пеленгов (грубых ошибок), т.е. измеренные пеленги $\alpha_{\text{изм}}$ на ИЮС не соответствует реальному с учетом допустимых ошибок пеленгования $\Delta\alpha$ ($\alpha_{\text{изм}} \neq \alpha \pm \Delta\alpha$) относительно общего числа пеленгов, полученных на одной мощности;

- определяется максимальное число ступенек с отсутствующими ошибочными пеленгами или с имеющимися ошибочными пеленгами, но в пределах допустимых значений точности пеленгования;

- определяется мощность юстировки $P_{\text{опт}}$ из числа ступенек, полученных на предыдущем шаге, при ко-

Р.К. БУРНОСОВ,
А.С. КРИКОВ, Т.В. ОСИПОВА
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД
КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО
ПЕЛЕНГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ
ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

торой достигается наибольшая эффективность калибровки ПУ предлагаемым методом.

7) По команде от программного обеспечения осуществляется сканирование с шагом ΔF в диапазоне рабочих частот ПУ на мощности $P_{\text{опт}}$. В ПУ вычисляются калибровочные фазовые поправки и в дальнейшем записываются в память устройства.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ПЕЛЕНГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

На рис. 3 изображена имитационная модель ПУ с реализацией итерационного метода калибровки в среде динамического междисциплинарного моделирования Simulink.

Данная модель состоит из нескольких блоков, каждый из которых выполняет функционал, представленный ниже.

Блок 1 имитирует работу пятиканального сверхширокополосного фазового ПУ и формирует истинные значения разностей фаз между каналами ПУ [2]. На рис. 4 и 5 представлена структура блока 1 и одного из формирователей (Baza 1) истинного значения разностей фаз блока 1.

Блок 2 имитирует систематические динамические фазовые ошибки приемных каналов ПУ и добавляет к истинной разности фаз блока 1 динамические фазовые ошибки приёмного тракта, величина и характер которых зависит от мощности принимаемого сигнала и особенностей каналов приемного тракта соответственно. На рисунке 6 представлена структура блока 2. Изменения динамических фазовых ошибок в каналах приемного тракта в зависимости от мощности принимаемого сигнала основаны на реальных данных, полученных на ПУ, установленном на авиационном носителе.

Блок 3 имитирует работу алгоритма определения пеленга на основании комплексного оценивания разностей фаз каналов ПУ в режимах калибровки или в отсутствие калибровки. На рис. 7–9 представлены структура блока 3 и графическое представление работы алгоритма в разных режимах работы.

Блок 4 выполняет вспомогательную функцию для работы блока 3.

Блок 5 формирует калибровочные значения разностей фаз при заданной мощности сигнала для работы блока 3 в режиме калибровки. Структура блока 5 идентична структуре блока 2 за исключением отсутствия операции суммирования истинных разностей фаз и динамических фазовых ошибок.

Для проверки работы предлагаемого метода модель проходит два этапа вычислений. На первом этапе на основании заданных величин, таких как частота и мощность принимаемого сигнала, истинное значение угла прихода сигнала и характер изменений динамических фазовых ошибок приемного тракта в зависи-

Рис. 3.
Общий вид модели

Рис. 4.
Структура блока 1

Рис. 5.
Формирователь истинного значения разности фаз блока 1

мости от мощности сигнала, определяются значения мощности калибровочного сигнала с шагом 1 дБ, при которых алгоритм с высокой точностью ($\pm 1^\circ$) определяет правильный угол прихода сигнала.

На втором этапе блоком 5 производится формирование калибровочных значений разностей фаз при поочередном введении мощности калибровочного сигнала, определенной на первом этапе. Далее проводится оценка эффективности калибровки при каждом значении мощности сигнала калибровки и выбор наиболее эффективной мощности калибровки.

В результате моделирования в среде Simulink была подтверждена высокая эффективность предложенного метода.

РИС. 6.

Структура блока 2

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПЕЛЕНГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Метод проведения автоматизированной калибровки предполагает обязательное использование контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), а также обработку большого количества входных данных. Для используемой КИА поставляется официальное программное обеспечение по управлению при помощи персонального компьютера, но последнее имеет следующие недостатки:

- непосредственное участие пользователя при

проведении измерений, что приводит к ошибкам, связанным с человеческим фактором;

- отсутствие автоматического управления КИА, что не позволяет контролировать фактическое состояние стенда.

Ввиду перечисленных выше недостатков с целью автоматизации процесса калибровки было разработано программное обеспечение, состоящее из шести модулей со следующими функциональными назначениями [1]:

- модуль взаимодействия с КИА по интерфейсу

Рис. 7.
Структура блока 3

Ethernet;

- модуль формирования сопутствующих сообщений пользователю;
- модуль обработки данных, полученных в результате управления КИА;
- модуль исполнения программы;
- два модуля графического интерфейса (главное окно программного обеспечения, окно обработки файла, полученного в результате измерений).

Разработанное программное обеспечение способно в автоматизированном режиме формировать и передавать команды управления на КИА, выполнять обработку и сохранение полученных данных, а также выполнять расчет оптимальной мощности для калибровки ПУ.

ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Главное окно программы, представленное на рисунке 10, содержит следующие поля:

- «Положение ИЮС», которое позволяет ввести координаты крайних точек на антенной панели, а также измеренное расстояние от ИЮС;
- «Настройка параметров ПУ», которое позволяет ввести значения исходных технических параметров ПУ;
- «Настройка работы генератора», которое позволяет ввести границы измеряемого диапазона ча-

Рис. 8.

Графическое представление работы алгоритма определения пеленга (в отсутствие калибровки) при мощности сигнала равной 15 дБмВт и заданном значении угла прихода сигнала 20°. Ошибка пеленгования составила 1.6°

Рис. 9.

Графическое представление работы алгоритма определения пеленга (в режиме калибровки) при мощности калибровочного сигнала равной 15 дБмВт и заданном значении угла прихода сигнала 20°

■ Программное обеспечение для калибровки пеленгационного устр... — □ ×

Положение ИЮС

Координаты реперных точек АП

X1	X2	X3
Y1	Y2	Y3

Расстояние от ИЮС

D1	D2	D3
----	----	----

Настройка параметров ПУ

Чувствительность ПУ дБм ▾

Динамический диапазон дБ ▾

Отклонение пеленга град ▾

Настройка работы генератора

Начальная частота МГц ▾

Конечная частота МГц ▾

Шаг перестройки частоты МГц ▾

Сохранить

Старт 0%

Расчетные значения

Расстояние до фазового центра

Минимальная мощность ИЮС

Максимальная мощность ИЮС

Оптимальная мощность

Загрузите данные в форму и нажмите кнопку "Сохранить" и далее кнопку "Старт"!

Рис. 10

Главное окно программного обеспечения

стот и шаг перестройки частоты с возможностью выбора единиц измерения;

– «Расчетные значения», которое позволяет отобразить результаты расчета некоторых вспомогательных параметров в следующих строках: «Расстояние до фазового центра», «Минимальная мощность ИЮС», «Максимальная мощность ИЮС», а также вывести оптимальную мощность юстировки в строке «Оптимальная мощность».

Консольное поле, расположенное ниже под полем «Расчетные значения», позволяет отобразить запросы, формируемые от КИА, в виде периодических сообщений, а также указать текущее состояние программного обеспечения.

При нажатии кнопки «Старт» запускается автоматизированный процесс измерения, процесс прохождения которого отображается в строке прогресса справа.

В процессе работы программного обеспечения выполняется передача команд управления на КИА для осуществления сканирования с шагом, указанным в поле «Шаг перестройки частоты», в диапазоне рабочих частот ПУ на рассчитанных мощностях, указанных в поле «Минимальная мощность ИЮС» и в поле «Максимальная мощность ИЮС» с шагом 1 дБ, а

также записывается файл с полученными значениями параметров для его последующей обработки.

Окно обработки файла, сформированного по результатам измерений, позволяет без повторного измерения выполнить расчет оптимальной мощности для юстировки, а также обрабатывать предыдущие файлы измерений.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования и натурный эксперимент с использованием аппаратуры, разработанной в АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга» показали, что использование предложенного метода приводит к существенному снижению влияния систематических динамических фазовых ошибок в многоканальных ПУ на основе фазированной антенной решетки за счет их компенсации, что приводит к увеличению точности пеленгования аппаратуры радиомониторинга. В свою очередь, возможность более точного измерения пеленга обеспечит уменьшение времени поиска официально незарегистрированного источника излучения и позволит оперативно нейтрализовать преднамеренные и непреднамеренные помехи. Применение предложенного метода на аппаратуре

военного назначения позволит обеспечить безопасность личного состава и военной техники, а также позволит дать более точные целеуказания для наступательных операций.

Полученные в ходе разработки программного обеспечения результаты подтвердили, что применение программы для автоматизации калибровки ПУ позволяет снизить временные затраты на проведение измерений без потери точности измерения параметров устройства и исключает ошибку пользователя при обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурносов Р.К., Осипова Т.В., Фоченков А.И. Автоматизация наземных испытаний аппаратуры радиоэлектронного наблюдения авиационного базирования // Вестник РАЕН, 2019. Т. 19. № 3. 57–64 с.
2. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы: Монография. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. 251 с.
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин А.В. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия-Телеком, 2006.
4. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М.: Воениздат, 2001. 456 с.

Бурносов Родион Константинович,
заместитель начальника отдела АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7 (926) 610-30-01, e-mail: 07-rs@rambler.ru

Криков Дмитрий Сергеевич,
инженер АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7 (967) 265-49-25, e-mail: DIMAN-08@mail.ru

Осипова Татьяна Владиславовна,
инженер-программист АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9
107078, Moscow, Novaya Basmannaya, 20/9
тел.: +7 (916) 013-78-97, e-mail: t.osipova.95@mail.ru