Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования «Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»

Алгоритмы калибровки малоэлементных антенных решёток

Специальность: 2.2.13 - Радиотехника,

в том числе системы и устройства телевидения;

2.2.14 - Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Джиган Виктор Иванович

Москва - 2021

Оглавление 2

Введение 5

Г лава 1. Обзор текущего состояния алгоритмов калибровки антенных

решёток 15

1.1 Особенности устройства антенных решёток и необходимость их

калибровки 15

1.2 Классификация методов калибровки антенных решёток 19

1.3 Устройство современных дискретных фазовращателей 22

1.4 Алгоритм вращения вектора электрического поля элемента и

алгоритм измерения двух элементов калибровки антенных решёток 24

1.5 Алгоритмы калибровки антенных решёток, основанные на трёх

измерениях выходной мощности 29

1.6 Алгоритмы Левита и Сораса калибровки антенных решёток 30

1.7 Алгоритмы калибровки антенных решёток с использованием

ортогональных и псевдо-ортогональных кодов 34

1.8 Цифровые антенные решётки и алгоритмы адаптивной обработки

сигналов 37

1.9 Выводы по главе 1 39

Глава 2. Алгоритмы калибровки с минимальным числом измерений

выходной мощности антенной решётки 40

2.1 Определение минимального требуемого числа измерений мощности .... 40

2.2 Погрешности измерения мощности суммарного сигнала антенной

решётки при переключении фазовращателя в различные состояния 43

2.3 Составляющие фазового набега калибруемого канала 47

2.4 Система уравнений и её решение для алгоритмов калибровки 49

2.5 Решение неоднозначности определения фазы 53

2.6 Исключение посторонних корней системы уравнений 54

-3-

2.7 Процедура предварительного фазирования перед калибровкой

антенной решётки 56

2.8 Результаты моделирования разработанных алгоритмов калибровки

антенных решёток 59

2.9 Выводы по главе 2 63

Глава 3. Алгоритм калибровки, не требующий предварительного

фазирования антенной решётки 65

3.1 Математическое описание предлагаемого алгоритма калибровки 65

3.2 Архитектура установок для калибровки антенных решёток 72

3.3 Результаты моделирования алгоритма калибровки антенных

решёток 74

3.4 Выводы по главе 3 81

Глава 4. Алгоритм перестановки управляющих кодов фазовращателей 82

4.1 Источники ошибок фазовращателей 82

4.2 Математическое описание алгоритма перестановки управляющих

кодов фазовых состояний фазовращателя 86

4.3 Пример результата выполнения алгоритма перестановки

управляющих кодов фазовращателя 87

4.4 Анализ ошибок фазовых состояний фазовращателя 89

4.5 Результаты моделирования перестановки управляющих кодов

фазовращателя 91

4.6 Выводы по главе 4 93

Глава 5. Корреляционный алгоритм калибровки антенных решёток 95

5.1 Математическое описание корреляционного алгоритма 95

5.2 Требования к ансамблю модулирующих последовательностей 101

5.3 Результаты моделирования корреляционного алгоритма 104

5.4 Выводы по главе 5 110

Глава 6. Калибровка антенных решёток на основе алгоритмов адаптивной

обработки сигналов 111

6.1 Формализация задачи калибровки цифровых антенных решёток с

помощью алгоритмов адаптивной фильтрации сигналов 111

6.2 Калибровка цифровых антенных решёток на базе RLS-алгоритмов 114

6.3 Результаты моделирования алгоритма калибровки цифровых

антенных решёток с помощью RLS-алгоритмов 119

6.4 Выводы по главе 6 123

Заключение 124

Список сокращений и условных обозначений 126

Список литературы 127

Приложение А Акты внедрения результатов диссертационной работы 142

А.1 Акт внедрения в АО «Радиотехнический институт

имени академика А.Л. Минца» 143

А.2 Акт внедрения в ООО «ЭЛИАРС» 144

А.3 Акт внедрения в «Национальном исследовательском университете

«МИЭТ» 145

Приложение Б Тексты программ моделируемых алгоритмов 146

Б. 1 Программа алгоритма калибровки 0-90-270 147

Б.2 Программа алгоритма калибровки 0-90-180 149

Б.3 Программа алгоритма калибровки 6+2 151

Заключение

В диссертационной работе рассмотрено решение научной задачи, заключающейся в разработке и исследовании новых алгоритмов калибровки, позволяющих определять разброс параметров каналов АР и компенсацию этого разброса. Такие алгоритмы не требуют физической модификации существующих АР и использования дорогостоящего измерительного оборудования. В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны и исследованы два алгоритма калибровки, в которых для оценки неизвестных комплексных коэффициентов передачи каналов АР требуются лишь три измерения её выходной мощности на один калибруемый канал. С учётом одного измерения, общего для всех каналов, полное число измерений выходной мощности для АР с числом каналов M равно 2M +1. Данные алгоритмы в ряде случаев могут требовать небольшого предварительного фазирования АР с целью однозначного определения опорного сигнала. Для реализации предложенных алгоритмов используются максимально разнесённые фазовые состояния калибруемого канала 0°, 90°, 180° в первом алгоритме и 0°, 90°, 270° во втором алгоритме. Погрешность оценки фазы комплексных коэффициентов каналов АР с помощью этих алгоритмов не превышает величины одного дискрета фазы, устанавливаемого с помощью дискретного ФВ.

2. Разработан и исследован алгоритм калибровки, в котором для оценки фазы неизвестных комплексных коэффициентов передачи каналов АР требуется восемь измерений её выходной мощности на один калибруемый канал. С учётом двух измерений, общих для всех каналов, полное число измерений мощности для АР с числом каналов M равно 6(M -1) + 2. Данный алгоритм не требует предварительного фазирования АР. Для реализации предложенного алгоритма используются фазовые состояния опорного канала 0° и 180° и калибруемого канала - 0°, 90°, 180° и 270°. Погрешность оценки фазы комплексных коэффициентов каналов АР не превышает величины одного дискрета фазы, устанавливаемого с помощью дискретного ФВ.

3. Разработан и исследован алгоритм калибровки ФВ, позволяющий в процессе калибровки или управления АР вместо теоретических квантованных значений фазовых сдвигов использовать те фактические значения, которые являются ближайшими к теоретическим. С помощью этого алгоритма максимальная ошибка ФВ уменьшается примерно в 1,5.. .2 раза. Эффективность предложенного алгоритма увеличивается при увеличении числа разрядов ФВ. Калибровка ФВ позволяет уменьшить выбросы в области боковых лепестков ДН, обусловленные значениями фазовых состояний ФВ, отличных от требуемых, улучшить точность установки главного лепестка ДН и повысить точность калибровки АР.

4. Разработан и исследован корреляционный алгоритм калибровки АР или ЦАР. Данный алгоритм использует два фазовых состояния 0° и 180° для модуляции тестового сигнала. Он позволяет оценивать отклонение модуля комплексного коэффициента передачи канала АР и его фазы с погрешностью, зависящей от отношения максимального числа символов используемой МП и числа каналов АР. Чем выше это отношение, тем меньше погрешность. Установлено, что при использовании МП с числом символов от 127 до 16383, погрешность оценки фазы меняется от 7,5° до 0,6° при числе каналов M = 4 и до 5,2° при M = 256. Аналогично, при использовании МП с числом символов от 127 до 16383, погрешность оценки модуля меняется от -7 дБ до -18 дБ при числе каналов АР M = 4 и до -8 дБ при M = 256.