



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.4>

УДК: 621.396.96

ДВУХЭТАПНЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ АФАР

М.А. Луковский ¹, А.М. Матвеев ²

¹ АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»

141190, Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

² Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)

125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

Статья поступила в редакцию 20 июня 2022 г.

Аннотация. На основе анализа известных методов технических решений предложен двухэтапный метод калибровки приемной активной фазированной антенной решетки (АФАР) радиолокационной станции (РЛС) дальнего обнаружения. Особенность данного алгоритма калибровки, не требующего физической модификации антенной решетки и использования дорогостоящего измерительного оборудования, позволяет определять различие характеристик каналов АР и выполнять компенсацию этого различия.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, приемо-передающий модуль, диаграмма направленности, фазовращатель, аналого-цифровой преобразователь, бортовая радиолокационная станция, бортовая цифровая вычислительная машина, калибровка, калибровка каналов, калибровка антенных решеток.

Автор для переписки: Луковский Михаил Александрович,

m_lucovskiy@mail.ru

Введение

Эффективность обработки радиолокационных сигналов моноимпульсной радиолокации определяется состоянием каналов передачи сигналов антенн.

Одним из наиболее важных критериев эффективности является рассогласование каналов относительно их комплексных коэффициентов передачи (рассогласование по амплитудным и фазовым характеристикам).

Эти рассогласования обусловлены как внутренними, так и внешними факторами. В этой связи необходимо упомянуть о различных временах канальной задержки, затухании сигналов в волноводных и коаксиальных трактах, канальных амплитудных и фазовых шумах, нестабильностях и неидентичностях амплитудно-фазовых передаточных характеристик отдельных модулей и компонент, различиях межканальных развязок, ошибках управления фазовращателями и аттенюаторами, рассогласованиях импедансов отдельных частей трактов, различных физических природных шумах и помехах, порожденных внешними воздействиями в том числе.

Неидентичность комплексных коэффициентов передачи каналов обуславливает понижение производимых количественных оценок сигнальной обработки, например, в части отношения сигнал-помеха, на входе приемных устройств, оценок характеристик качества радиолокаторов (точности измерения пространственных координат, скоростей, доплеровских смещений частоты, оценок амплитуды и их дисперсий).

Отдельно стоит упомянуть задачу обнаружения отраженных сигналов, в которой статистические характеристики (вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги) зависят от соотношения сигнал-помеха реализации смеси сигналов на входе приемных устройств.

Актуальной задачей является решение комплекса проблем, связанных с амплитудно-фазовым выравниванием и калибровкой каналов передачи для решения целевых задач моноимпульсной радиолокации.

Антенна АФАР содержит большое количество передающих, приемных или приемно-передающих активных модулей, в состав которых в общем случае

входят усилители, генераторы, преобразователи частоты, согласующие устройства и т. д. При этом параметры однотипных устройств не являются абсолютно идентичными из-за технологических причин, температурных воздействий, старения и др. Вследствие этого амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля на апертуре антенны становится неравномерным, что приводит к снижению ее коэффициента усиления и росту уровня боковых лепестков диаграммы направленности (ДН). Для поддержания требуемых параметров в процессе эксплуатации необходимо периодически проводить калибровку АФАР. Однако методы и способы калибровки таких антенных решеток имеют ряд особенностей и существенно отличаются от калибровки обычных антенн [1].

Ранее в статье [2] был проведен сравнительный анализ и обзор известных методов калибровки:

- Бесфазовые методы: (метод вращения вектора электрического поля элемента (Rotating-Element Electric Field Vector) – REV-метод, метод измерения двух элементов (Measurement of Two Elements) – MTE-метод, алгоритм Сораса (Sorace), Левита (Leavitt), Корреляционный алгоритм.

- Адаптивные методы: (метод Music, метод Кейпона, алгоритм SMI (Sample Matrix Inversion algorithm), алгоритм наименьшей среднеквадратичной ошибки (LMS), алгоритм Квази-Ньютона).

- Автокалибровочные методы: (метод Фридландер-Вайса, метод Ванга-Кедзоу, метод Эстели-Свиндлехарста-Оттерсона).

Основной недостаток рассмотренных методов калибровки заключается в отсутствии способа устранения рассогласования временной канальной задержки, затухания сигналов, канальных шумов и различных физических шумов антенны.

С учетом проведенного сравнительного анализа методов и описанных недостатков было принято решение разработать новый алгоритм определения и устранения фазовых и амплитудных шумов в аналоговой и цифровой части

антенны АФАР, использующий двухэтапный метод калибровки антенны АФАР на основе ЦОС.

Набор известных на сегодняшний день методов калибровки антенных решеток, упомянутых нами ранее в [2] имеют ряд проблем, к которым можно отнести отсутствие способа устранения рассогласования временной канальной задержки, затухания сигналов, канальных шумов и различных физических природных шумов антенны. Частично или полностью решить указанные проблемы предлагается за счет описываемого в статье алгоритма.

Новизна предлагаемого метода калибровки АР видится в определении и устранении фазовых и амплитудных шумов в аналоговой и цифровой части антенны АФАР, использующий двухэтапный метод калибровки антенны на основе ЦОС. Данный подход предназначен для радиолокационных сигналов и используется при обработке сигналов, в части оценивания их параметров обнаружения и др.

На первом этапе разработки алгоритма были поставлены **основные цели работы:**

- разработка двухэтапного алгоритма калибровки, не требующего физической модификации антенной решетки и использования дорогостоящего измерительного оборудования, позволяющих определять различие характеристик каналов АР и выполнять компенсацию этого различия;
- апробация разработанного метода и двухэтапного алгоритма с использованием моделей целевых задач моноимпульсной радиолокации;
- экспериментальное исследование разработанного метода и алгоритма калибровки АФАР с использованием лабораторных аппаратных средств моноимпульсной радиолокации.

В результате в ходе работы для достижения поставленных целей при исследовании и разработке алгоритма калибровки каналов АФАР были решены следующие задачи:

- 1) Разработана модель АФАР и ПО для решения целевых задач моноимпульсной радиолокации, включая модели на основе подходов с использованием

методов машинного обучения (в частности, класса искусственных нейронных сетей);

- 2) Выработаны рекомендации по использованию предлагаемого двухэтапного алгоритма калибровки для решения целевых задач моноимпульсной радиолокации;
- 3) Разработана методика настройки и калибровки антенных элементов (АЭ) в составе АФАР;
- 4) Разработана методика и алгоритм оценивания амплитудно-фазовых характеристик сквозных каналов АФАР и блока ЦОС;
- 5) Разработана методика и алгоритм настройки и калибровки сквозных каналов АФАР и блока ЦОС;
- 6) Разработана методика и алгоритм для формирования суммарно-разностных ДН АФАР и оценки пеленгов;
- 7) Проведено экспериментальное исследование характеристик АФАР с использованием Автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (АИВК).

Рассмотрим основные этапы разработки и принципы работы алгоритма в АФАР.

На рисунке 1 представлена структурная блок-схема, где представлены основные этапы проверки алгоритма, выполнения настройки и проведения калибровки в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ).

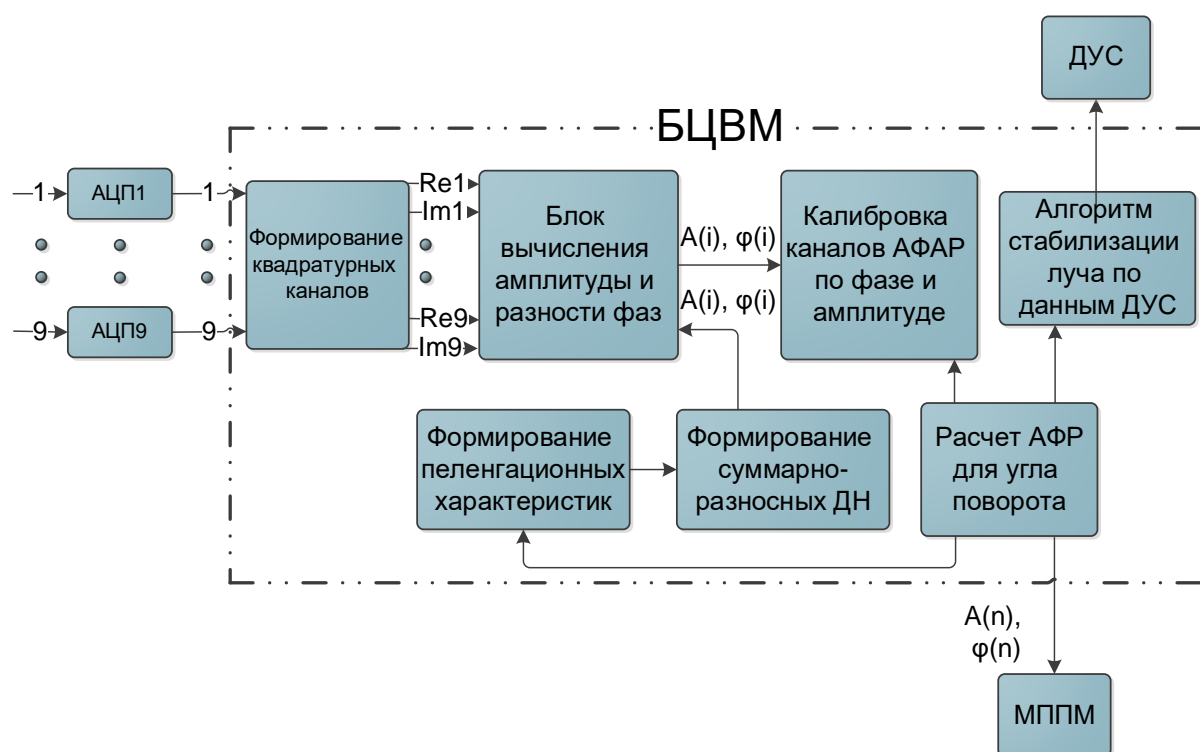


Рис. 1. Структурная блок-схема алгоритма проверки, калибровки и настройки (АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ДУС – датчик угловых скоростей, МППМ – приемо-передающий модуль)

В БЦВМ на каждый из 9-ти аналоговых каналов поступает аналоговый сигнал, АЦП принимает данные и выполняет аналогово-цифровое преобразование. Полученные после преобразования цифровые сигналы программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) считывают, обрабатывают и производят передачу в центральный процессор (ЦП). Так как ЦП является ведущим, то по прерыванию происходит передача данных в цифровой сигнальный процессор (ЦСП).

В ЦСП происходит формирование квадратурных каналов и выходные квадратурные сигналы поступают на блок, где вычисляется разность амплитуды и фазы сигнала с каждого из 9 каналов.

1) Сигналы управления амплитудами и фазами поступают на блок, где выполняется алгоритм калибровки каналов АФАР по фазе и амплитуде, заключающийся в амплитудно-фазовом выравнивании всех каналов. В результате сигналы поступают в блок расчета амплитудно-фазового распределения (АФР) для реализации угла поворота основного лепестка ДНА и все рассчитанные амплитуды и фазы сигналов поступают в приемо-передающий

модуль (ППМ) в качестве сигналов управления фазовращателями и аттенюаторами каналов ППМ.

2) Выходные сигналы амплитуды и фазы поступают на блок для расчета и формирования суммарно-разностной ДН. По результатам формирования ДН, в следующем блоке формируется пеленгационная характеристика (ПХ) для последующего расчета АФР угла поворота.

1. Разработанный двухэтапный алгоритм

Данный алгоритм состоит из двух основных видов измерений:

1) Измеряются ДНА, направленные характеристики излучателей АР и всей решетки в целом, результатом измерений которых является их диаграмма направленности.

2) Измеряются фазово-частотные (ФЧХ), амплитудно-частотные (АЧХ) характеристики каналов ППМ без учета излучателей и проводится калибровка каналов ППМ, заключающаяся в выравнивании характеристик ППМ по результатам измерений.

Основной принцип алгоритма калибровки (два этапа):

а) калибровка ППМ (исполняется один раз),
б) калибровка радиолиний (нестационарное поведение за счет температуры, временной деградации элементов (калибровка с периодом времени)) (исполняется всегда при работе антенны АФАР).

На рисунке 2 представлена структурная блок-схема цифровой обработки Этап №1 и Этап №2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма ЦОС калибровки АФАР (Этап1 и Этап2)

В результате достоинство данного алгоритма калибровки заключается в применении двухэтапного метода калибровки:

- **Этап №1** – Выравнивание длительности длины линий аналоговой части антенны.
- **Этап №2** – Компенсация каналов приемо-передающего модуля по амплитуде и фазе.

Рассмотрим более подробно все этапы принципа работы двухэтапного алгоритма:

– Этап №1

Контрольный сигнал (определенной мощности), полученный с генератора, поступает на приемную часть антенны. Линии, по которым поступает сигнал на полотно антенны, под влиянием различных факторов в результате получают разной длины и в связи с этим возникают задержки в сигнале. Длительность линии определяется связанных с разностью фаз и возникает неопределенность до 2π при определении фазы.

Этап калибровки №1 заключается в компенсации в сигналах различных задержек по времени и выравнивании амплитуд, различающихся вследствие взаимного влияния элементов АР.

– Этап №2

Учет и компенсация сигнальных неидентичностей в ППМ и выбор метода для калибровки амплитуды в приемо-передатчике.

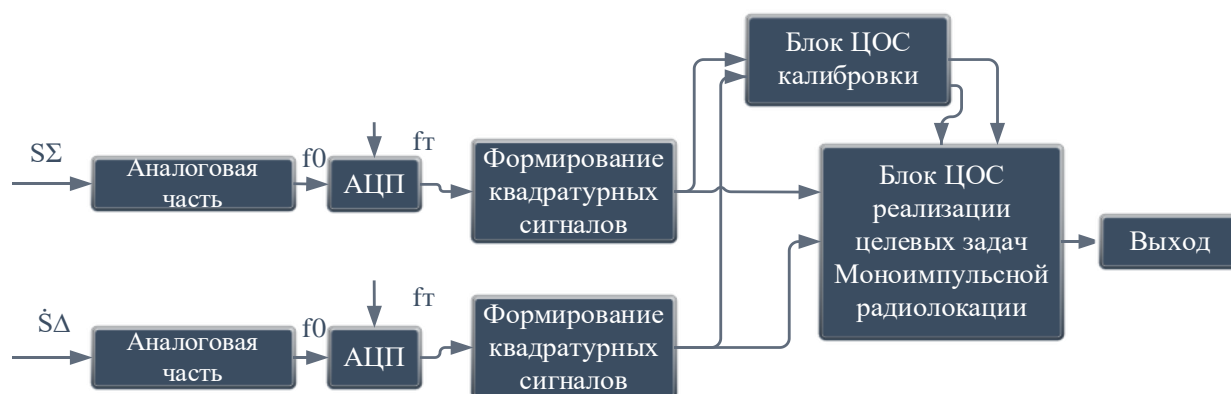


Рис. 3. Общая структурная блок-схема алгоритма ЦОС калибровки АФАР

На рисунке 3 представлена структурная блок-схема, в которой на вход аналоговой части по двум каналам поступают сигналы (суммарный $S\Sigma$ и дельта $\dot{S}\Delta$ (разностный). Сигнал с аналоговой части поступает на промежуточную по f -тактовой частоте на вход АЦП. В данном случае f -тактовая согласована с центральной частотой f_0 и с частотной полосой Δf радиолокационного сигнала. Частота задается на основе метода цифровой обработки сигналов (ЦОС) методом передискретизацией. Для того чтобы снизить требования к АЦП используется метод передискретизации переноса несущей частоты на более низкую без использования цифровых гетеродинов. В ходе обработки сигналов в аналоговой части возникают узкополосные помехи, в результате наличие данных помех в полосе работы устройств становится причиной неверного детектирования переданного сигнала, и, соответственно, ошибок при декодировании.

Аналоговая часть включает в себя разные аналоговые устройства такие как (МШУ, аналоговые фильтры) и др.

С блока АЦП цифровые сигналы с двух каналов поступают на блок формирования квадратурных каналов для получения квадратурных сигналов. С квадратурных каналов сигналы поступают на блок ЦОС калибровки для решения целевых задач моноимпульсной радиолокации.

2. Практическая часть реализации двухэтапного алгоритма

В выражении 1 вычисляется суммарный сигнал по первому каналу и по формуле 2 вычисляется разностный сигнал по второму каналу.

$$- SUM(S) \quad R_S = A e^{j(\varphi_S + \omega t)} \quad (1)$$

$$- Delta1(D_1) \quad R_D = A_D e^{j(\varphi_D + \omega t)}, \quad (2)$$

где R_S — не изменяется. φ_D и φ_S — фазы в суммарном и разностном каналах.

$$R_D = \frac{R_D}{|R_D|} * |R_S| * e^{-i\varphi_D} * e^{-i\varphi_S}. \quad (3)$$

Для уменьшения влияния теплового шума производится усреднение величины R_D , что ведет к уменьшению дисперсии фазы.

Диаграммы направленности суммарного и разностного сигнала вычисляются следующими выражениями:

$$u_c(t, \theta) = \exp i (\omega_{\text{пр}} t + \varphi_1), \quad (4)$$

$$u_p(t, \theta) = \frac{k_2}{k_1} u \theta \exp i (\omega_{\text{пр}} t + \varphi_2), \quad (5)$$

где φ_1 и φ_2 – фазовые сдвиги в каналах, ω – частота.

3. Программная часть реализации двухэтапного алгоритма

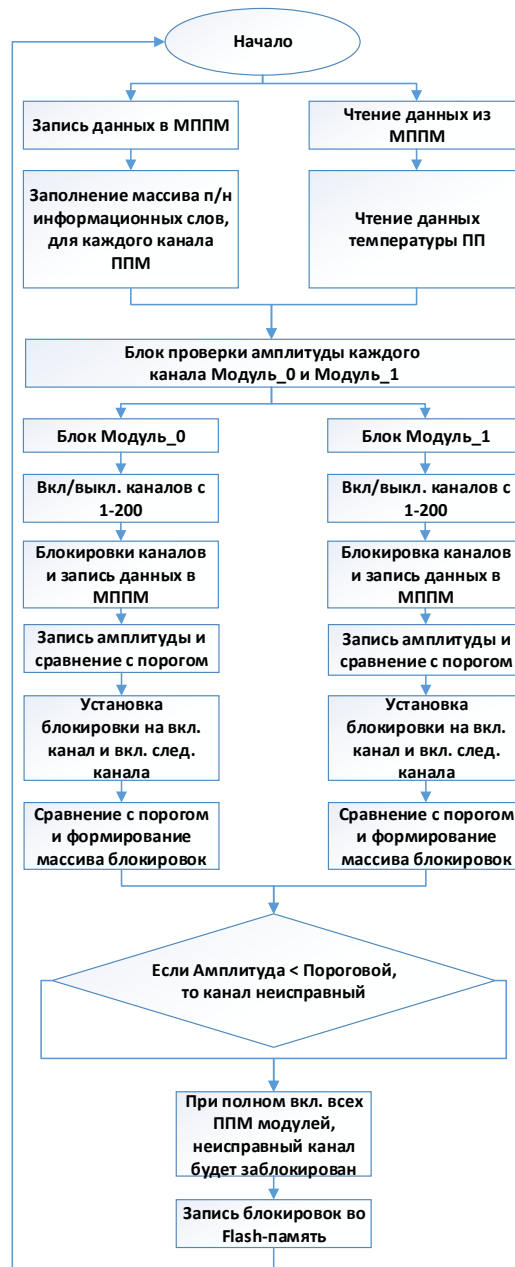


Рис. 4. Блок-схема-1. Принцип чтения и записи данных в ППМ

Всего в антенне 200 приемо-передающих каналов и 4 приемных каналов. Вначале формируется массив с порядковыми номерами слов, которые соответствуют расположению информационных слов для каждого канала ППМ.

На каждой записи в память ППМ отправляет ответные слова в зависимости от того, какая команда записи была совершена. По такому принципу заполняется и ответный массив температуры, только в ответном слове содержатся значения непреобразованной температуры. После выполняется операция преобразования температуры и данные записываются в память.

4. Принцип работы блоков Модуль_0 и Модуль_1

Блоки **Модуль_0** и **Модуль_1** выполняют проверку амплитуды каждого канала. Их отличие состоит только в физическом подключении сумматоров. В ЦСП0 используется стандартное подключение 8 подрешеток на 8 каналов БЦВМ. На 9 канал подается сигнал с генератора сигналов, после преобразования частоты сигнал подается на 9 канал БЦВМ. Данный канал используется и в других блоках.

В блоке **Модуль_1** используются дополнительные сумматоры. Восемь подрешеток суммируются в одну и подключаются к 1 каналу. После преобразования частоты этот сигнал подключается к 1 каналу БЦВМ, а сигнал через кабель от генератора сигналов подается на 9 канал и после преобразования частоты подключается к 9 каналу БЦВМ.

В данном блоке используется 8 основных подрешеток и 200 приемо-передающих каналов.

Блоки **Модуль_2** и **Модуль_3** выполняют калибровку амплитуды, их отличие состоит в физическом подключении сумматоров.

– В блоке **Модуль_2** происходит калибровка по амплитуде каждой подрешетки отдельно, по амплитуде минимального канала в подрешетке.

– В блоке **Модуль_3** происходит калибровка по амплитуде во всей решетке и по амплитуде минимального канала во всей решетке. Это связано с тем, что все подрешетки суммируются в один канал.

В блоке **Модуль_4** и **Модуль_5** происходит калибровка по фазе каждого канала из 200 возможных.

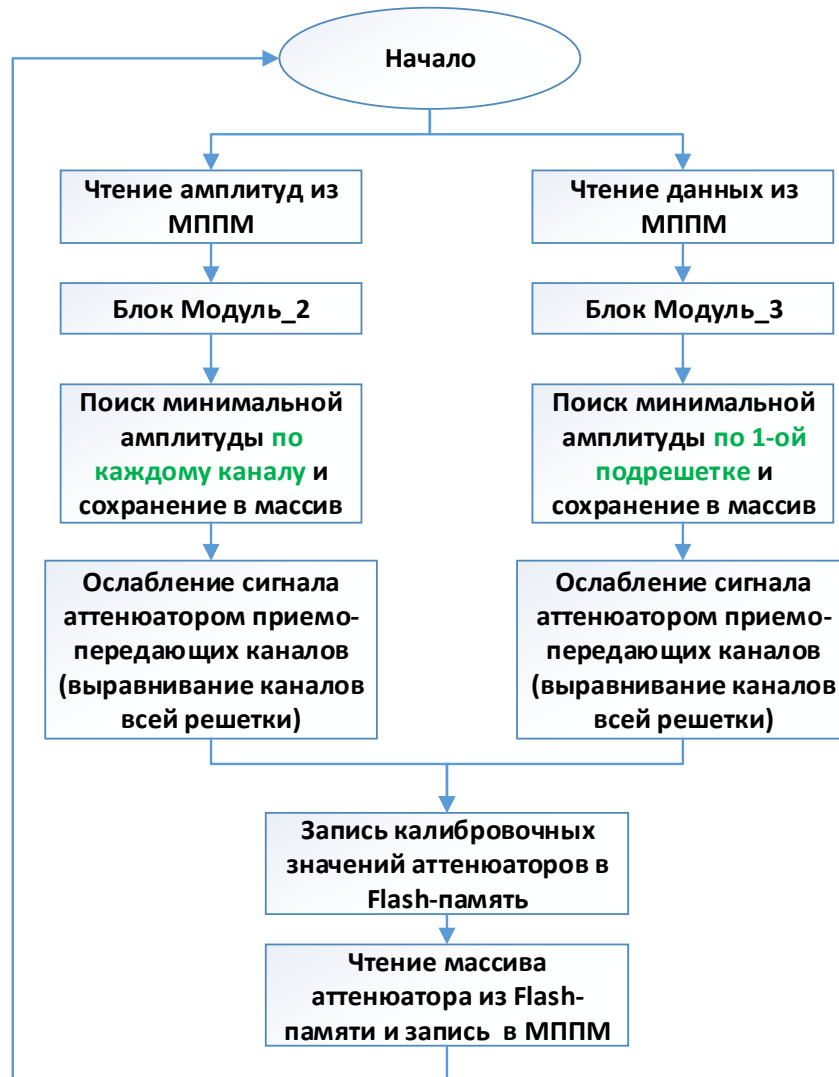


Рис. 5. Блок-схема-2. Алгоритм калибровки амплитуды

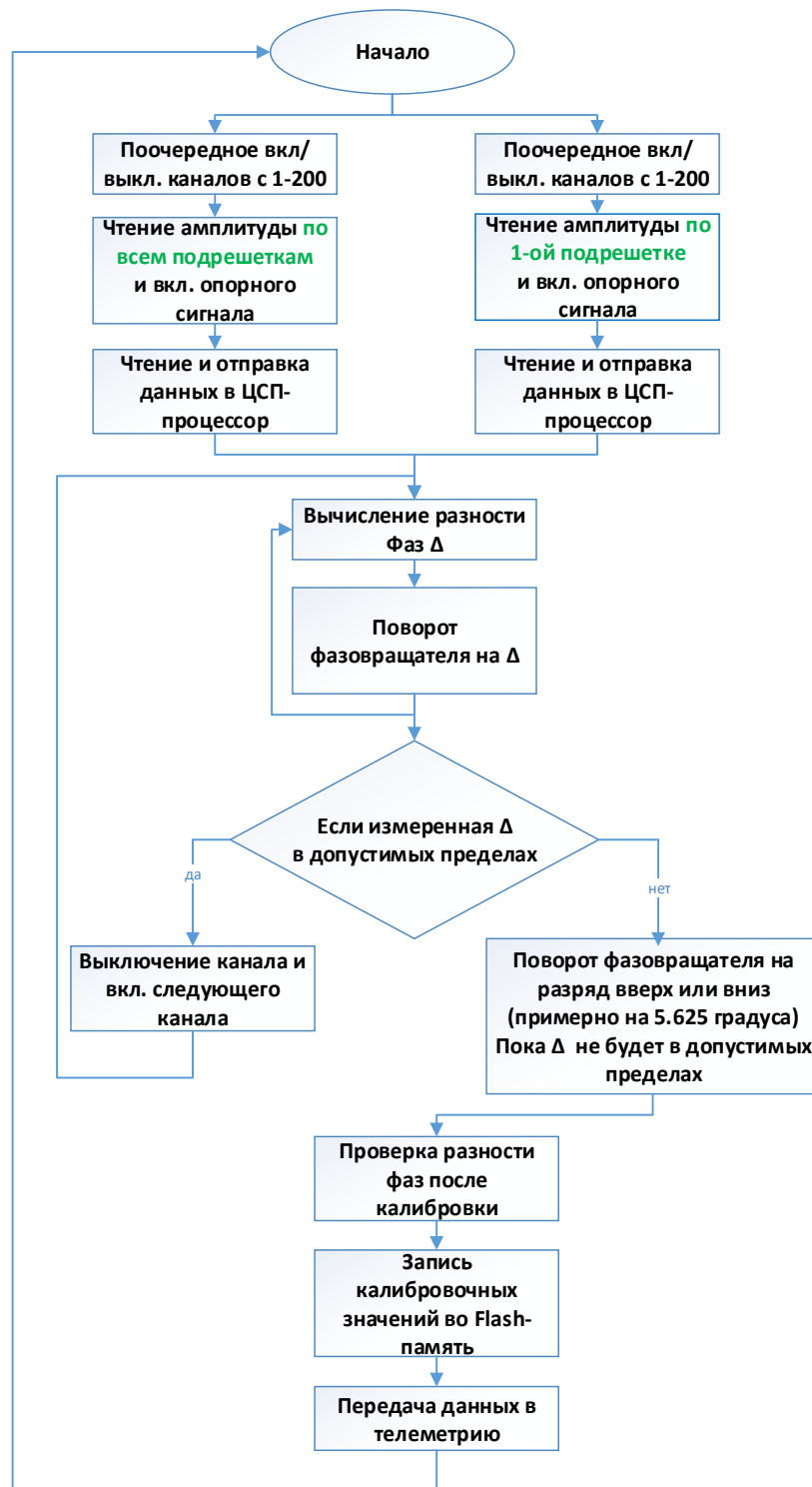


Рис. 6. Блок-схема-3. Алгоритм калибровки фазы

Каналы включаются и выключаются поочередно, начиная с 1 и заканчивая 200. Опорный (суммарный с подрешеток) сигнал всегда включен. Номер канала БЦВМ на который приходит измеряемый включенный канал (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) и опорный 9-канал отправляются в ЦСП для вычисления разности фаз (дельту). На измеренную дельту поворачивается фазовращатель и

после поворота повторно вычисляется дельта. Если измеренная дельта лежит в допустимых пределах, тогда этот канал выключается и включается следующий по порядку. Если измеренная дельта не лежит в допустимых пределах (так как реальный поворот фазовращателя отличается от предполагаемого) тогда в зависимости от того больше или меньше вычисленная дельта, выполняется операция сдвига фазовращателя на один разряд вверх или вниз (сдвиг равняется примерно 5.625 градуса). Точнее данная операция выполняется до тех пор, пока дельта не будет лежать в допустимых пределах.

Каналы включаются и выключаются поочередно, начиная с 1 и заканчивая 200. После выполнения блока **Модуль_5**, выполняется запись калибровочных значений фазовращателей в память. После выполняется чтение калибровочных значений аттенюаторов и фазовращателей из памяти, для дальнейшей записи их в ППМ и в результате происходит проверка разности фазы после калибровки.

5. Методика проведения эксперимента и результаты исследования алгоритма калибровки АР

Оборудование и программное обеспечение:

При проведении испытаний для разработки и исследования алгоритма для антенны АФАР использовалось следующее оборудование и программное обеспечение:

- 1) Безэховая комната,
- 2) Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК),
- 3) Поворотный стол,
- 4) Антенна АФАР (установлена на поворотном столе),
- 5) ПК (оператора и разработчика),
- 6) Программа управления поворотным столом,
- 7) Среда разработки для отладки программы и специальная программа для получения и записи данных,

8) Стенд формирования сигналов.

На рисунке 7 представлена структурная схема стенда и необходимого оборудования:



Рис. 7. Структурная схема стенда и оборудования

На рисунке 8 – представлена безэховая камера, в которой размещается антенна АФАР (закрепленная на поворотном столе), для проведения исследований и экспериментов:

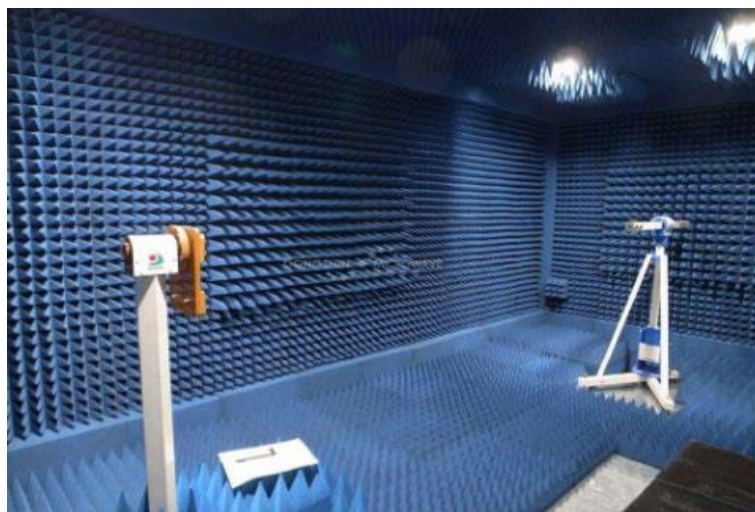


Рис. 8. Безэховая камера

5.1. Этапы проведения измерений и калибровки АФАР

Экспериментальные измерения проводятся в безэховой камере (БЭК) на стенде для электромеханических испытаний автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (АИВК).

5.2. Условия проведения экспериментальных измерений

Для проведения исследования и калибровки антенны был выполнен следующий алгоритм действий:

Значения мощности генератора – 10дБм.

Скорость поворота ОПУ и стенда – 2град/сек.

- 1) Этапы проведения экспериментальных измерений.
- 2) Изделие АФАР установлено на опорно-поворотное устройство стенда для электромеханических испытаний.
- 3) Проводится юстировка относительно излучающей антенны.
- 4) Проверка уровней амплитуды каждого канала АФАР с составлением массива блокировок и записи его в память. Порог блокировки каналов устанавливается на 37,5 дБ.
- 5) Калибровка каналов АФАР каждой из подрешеток выполняется по минимальному уровню мощности, но не ниже установленного порога. Запись калибровочных значений аттенюаторов ППМ в память.
- 6) Калибровка по фазе каналов АФАР относительно 9-го канала и запись калибровочных значений фазовращателей ППМ в память.
- 7) Проведение измерения ДН и пеленгационных характеристик изделия.
- 8) Процесс и алгоритм проведения экспериментальных измерений.
- 9) Для взаимной точной установки и юстировки измеряемой и излучающей антенны используется механизм совмещения оптических осей. Механизм представляет собой лазерный дальномер и мишень для лазерного луча, закрепленные на едином основании с излучающей антенной.

Изделие АФАР размещается на стенде так, чтобы ее апертура была ориентирована по азимуту и углу места таким образом чтобы, лазерный луч, отраженный от зеркала, приложенного к апертуре, попал в мишень.

- 10) На антенное полотно АФАР с излучающей антенны подается непрерывный сигнал. Через программу «Стенд» включается алгоритм проверки уровней амплитуды каждого канала.

В антенной решетке поочередно включаются все каналы и составляется массив значений уровней мощности каждого канала. Каналы уровень мощности, которых не превышает заданного значения, после записываются в память как заблокированные и при дальнейших измерениях не участвуют.

- 11) На антенное полотно АФАР с излучающей антенны подается непрерывный сигнал. Через программу «Стенд» включается алгоритм калибровки каналов АФАР каждой из подрешеток по минимальному уровню мощности.

В антенной решетке поочередно включаются каналы в каждой из подрешеток и записывается массив значений уровней мощности каждого канала в подрешетке.

После выбирается канал с минимальным значением уровня мощности, а остальные каналы при помощи аттенюаторов ППМ приравниваются к нему с максимально близким значением мощности с учетом разрядности аттенюаторов. Составляется массив значений аттенюаторов каждого канала и записываются в память.

- 12) На антенное полотно АФАР с излучающей антенны подается непрерывный сигнал. Тот же сигнал с генератора подается на вход 9 канала приемника. Через программу «Стенд» включаем алгоритм калибровки по фазе каналов АФАР относительно 9-го канала.

В антенной решетке поочередно включаются все каналы. Значение фазы в канале сравнивается с фазой 9-го канала приемника и при помощи фазовращателей в ППМ приравниваются к нему с максимально близким

значением, с учетом разрядности фазовращателей. Составляется массив значений разрядов фазовращателей каждого канала и записываются в память.

13) На антенное полотно АФАР с излучающей антенны подается непрерывный сигнал.

Поочередно записывается массив блокировок, массив значений аттенюаторов, массив значений фазовращателей. После включаются все каналы АФАР и выравниваются значения уровней мощности подрешеток. Производится измерение уровней мощности в подрешетках при повороте антенного полотна (от $+20^\circ$ до -20°). Производим расчёт суммарного и разностных каналов и пеленгационных характеристик.

14) На антенное полотно АФАР с излучающей антенны подается непрерывный сигнал. Поочередно записывается массив блокировок, массив значений аттенюаторов, массив значений фазовращателей. Далее включаются все каналы АФАР и выравниваются значения уровней мощности подрешеток. Производится измерение уровней мощности в подрешетках при качании антенного полотна (от $+2^\circ$ до -2°).

6. Результаты эксперимента калибровки антенны АФАР

В результате исследования и применения алгоритма с помощью ПО в Mathworks Matlab были получены результаты построения графиков (суммарной и разностной ДН) и выполнен расчет следующих параметров (Ширина луча по суммарной ДН и Расхождение установки луча) по заранее полученным данным со стенда АФАР.

Далее были получены ДН (суммарного и разностного сигналов) и на рисунках 9, 10, 11, 12, 13 представлены результаты ДН АФАР до и после алгоритма калибровки.

6.1. Результаты до калибровки антенны

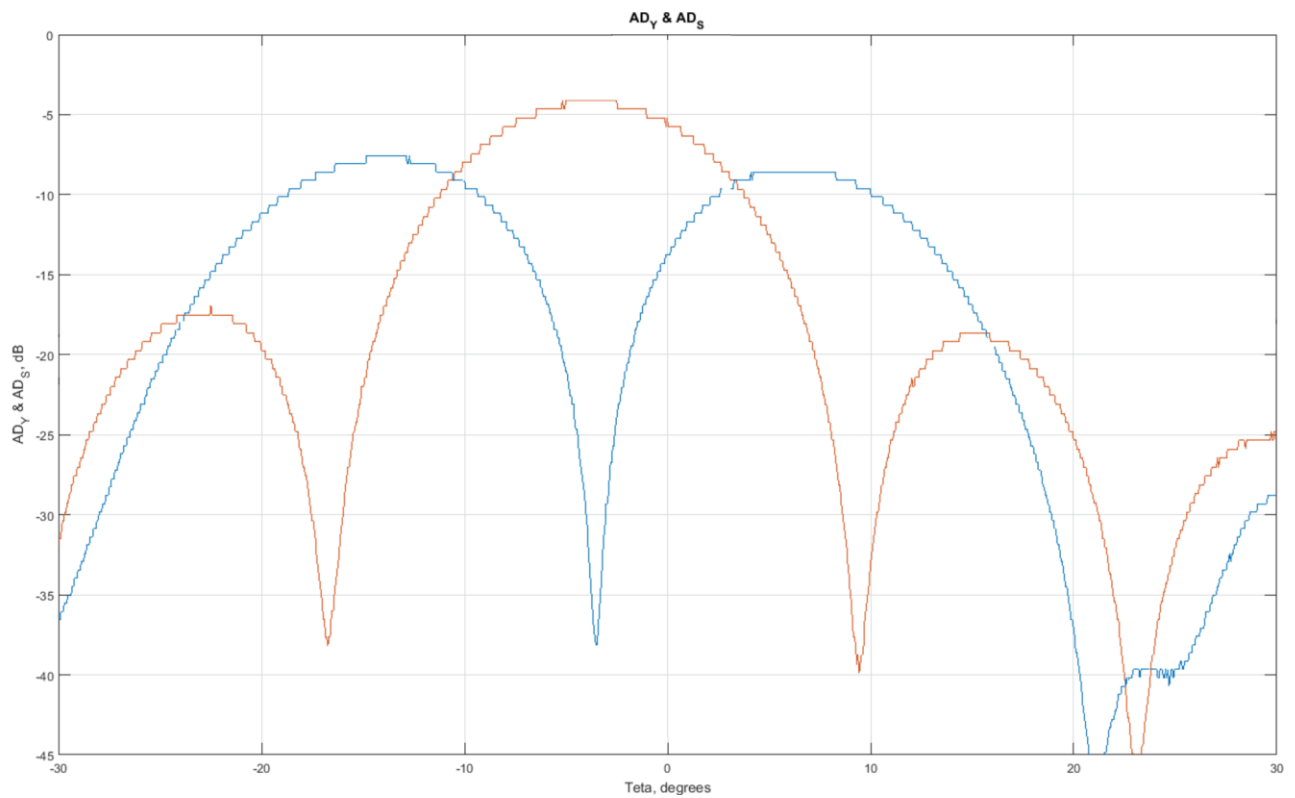


Рис. 9. Суммарно-разностная ДН: азимут 0° , угол места 0°

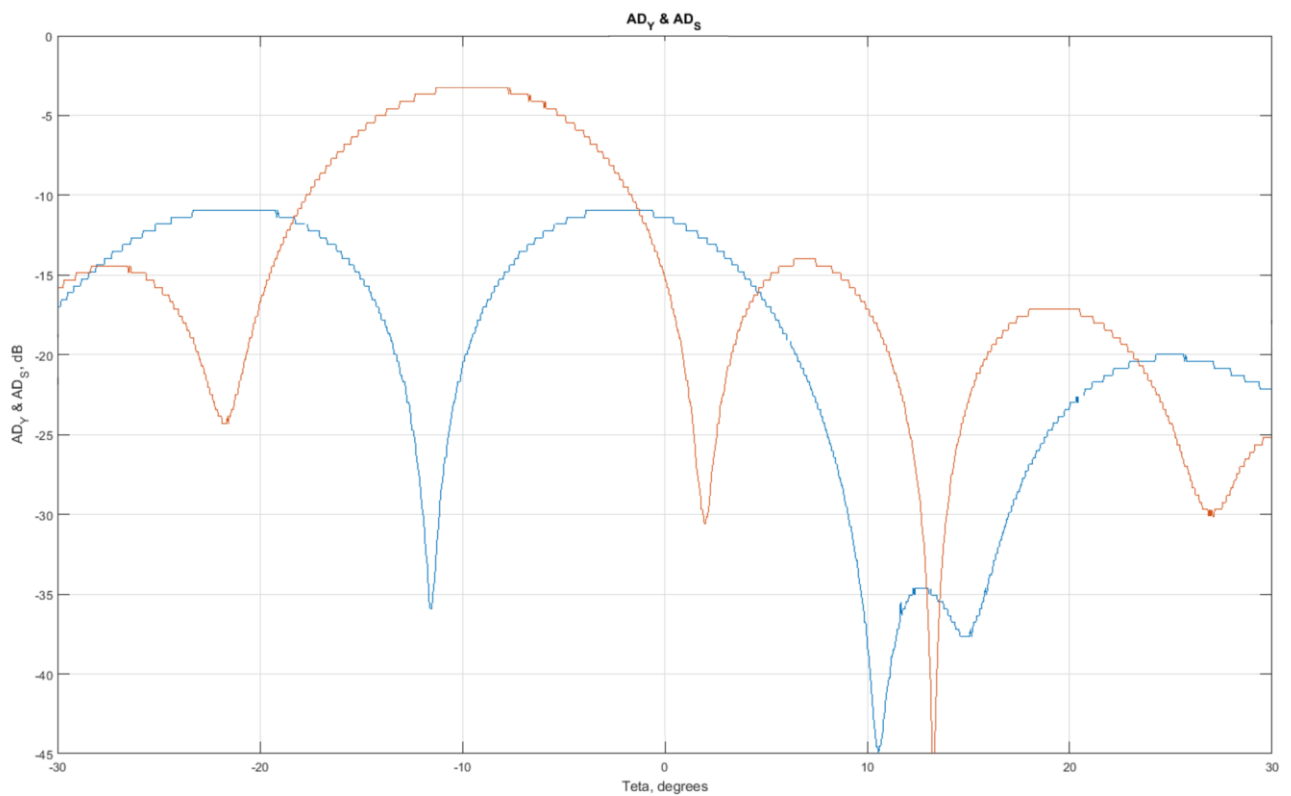


Рис. 10. Суммарно-разностная ДН: азимут -10° , угол места 0°

6.2. Результаты после калибровки антенны

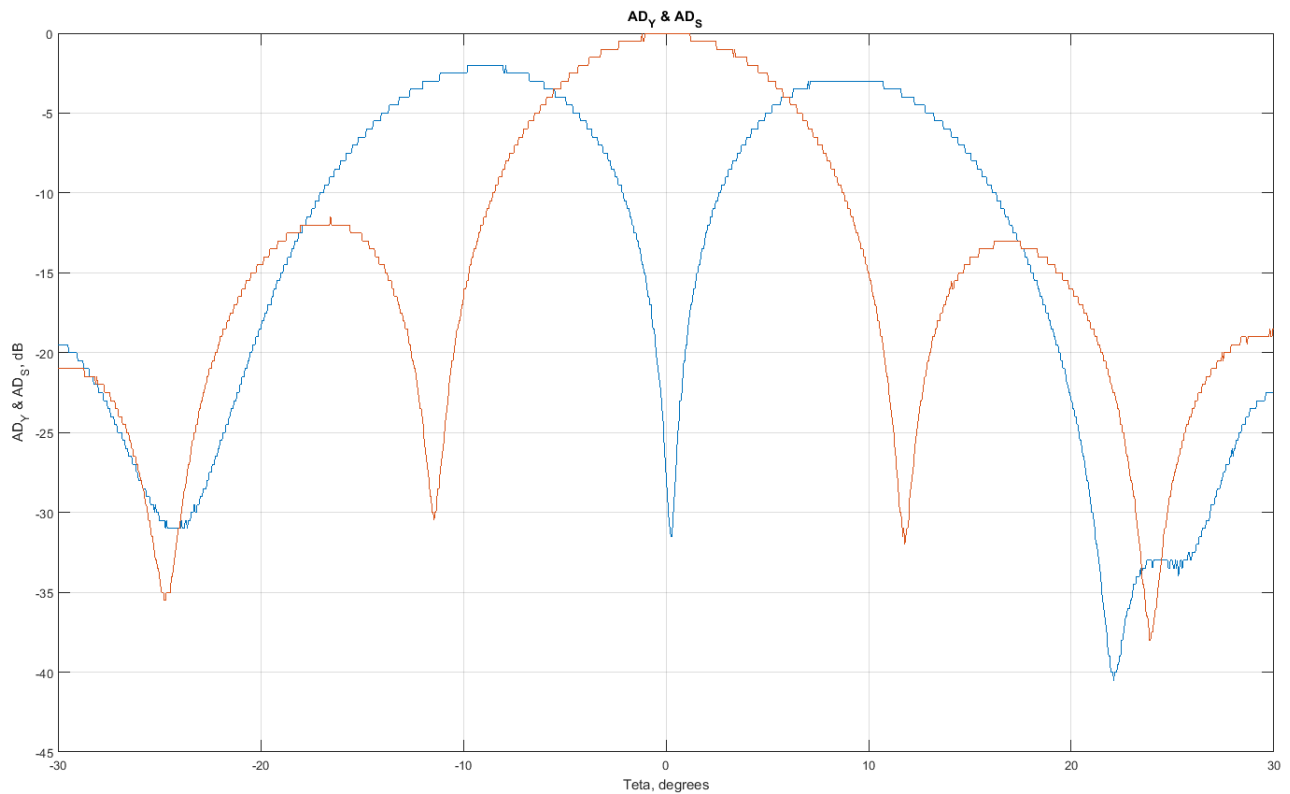


Рис. 11. Суммарно-разностная ДН: азимут 0° , угол места 0°

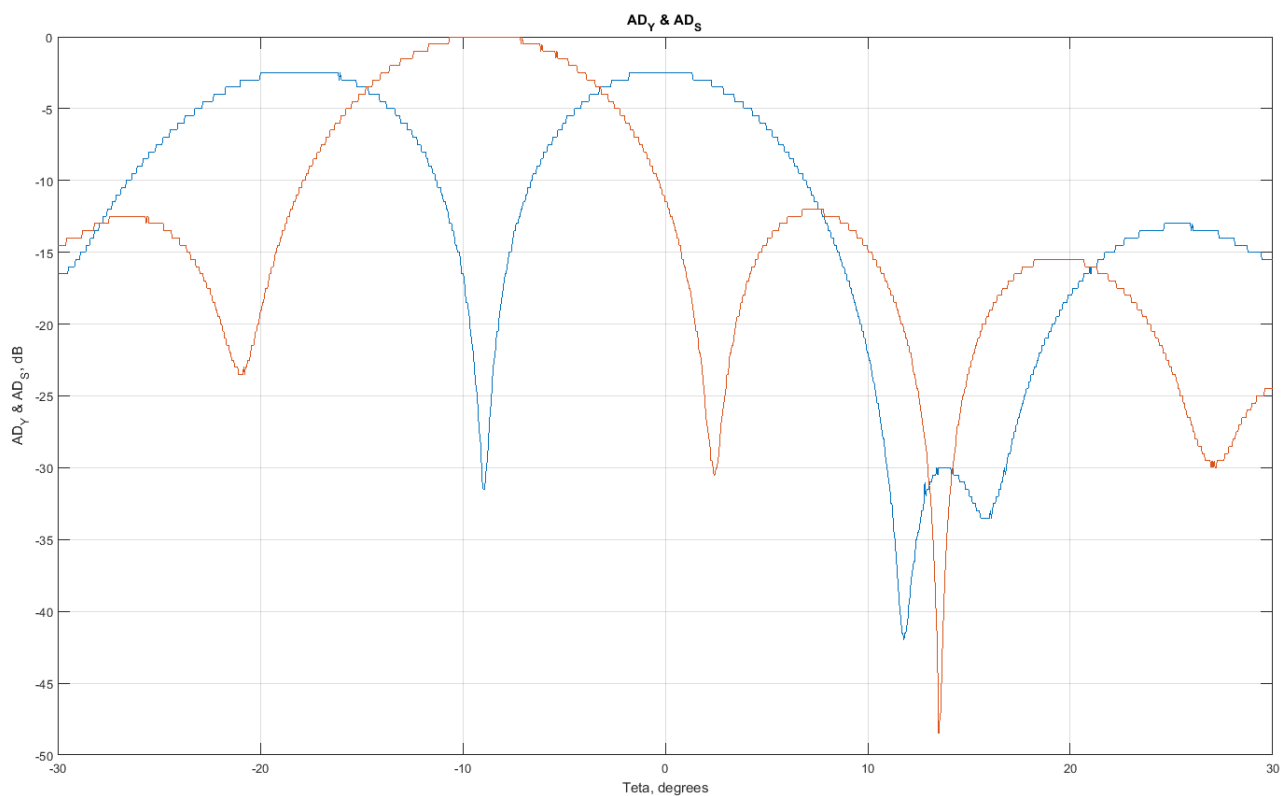


Рис. 12. Суммарно-разностная ДН: азимут -10° , угол места 0°

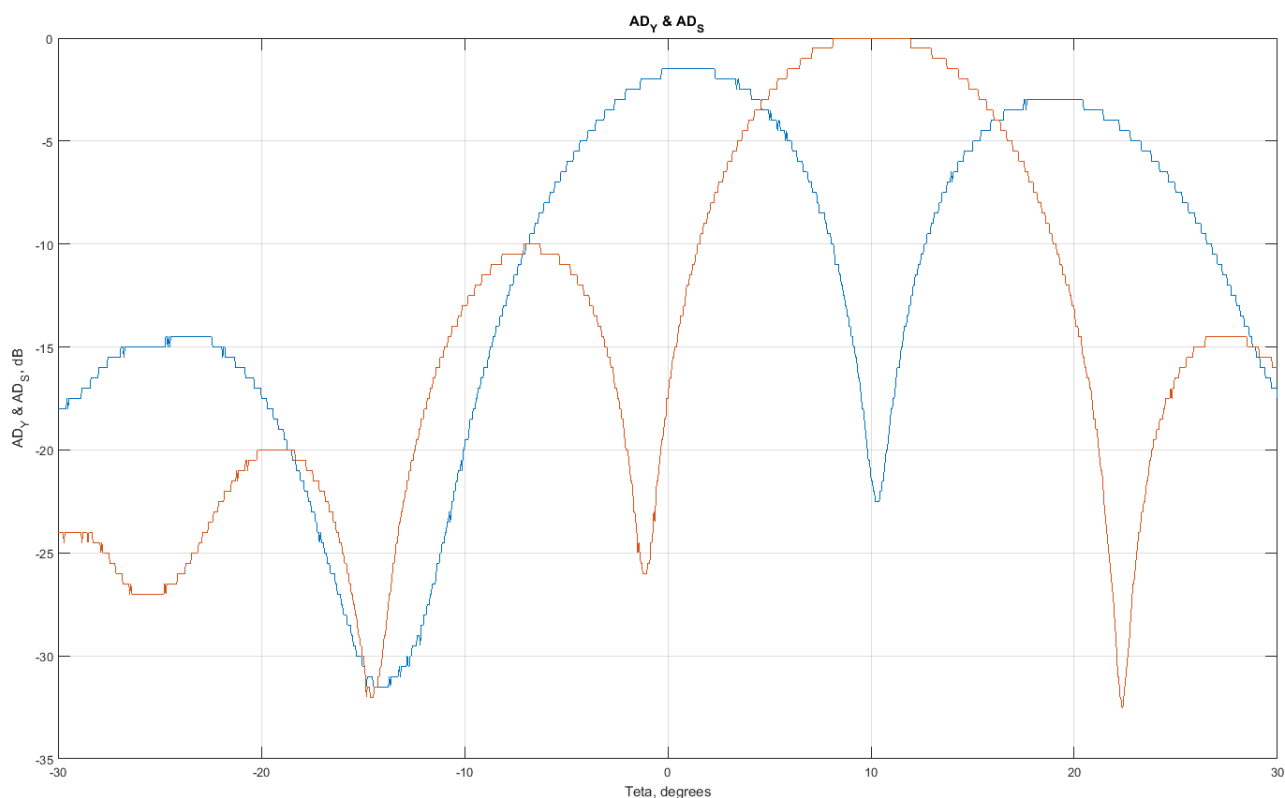


Рис. 13. Суммарно–разностная ДН: азимут $+10^\circ$, угол места 0°

Согласно полученным результатам, диаграмма направленности, представленная на рисунке 11 суммарно-разностного сигнала, получили без смещения относительно центра нуля. На рисунке 12 выполнен поворот по азимуту на $+10$ градусов, диаграмма получились относительно центра также без смещения нуля, что подтверждает преимущество и эффективность данного двухфазового алгоритма калибровки антенны АФАР.

В результате основным преимуществом данного алгоритма является повышение точности в результате получения ДН антенны. Результаты экспериментов в ходе проведенных исследований подтверждают эффективность и достоверность данного алгоритма.

Недостатком данного алгоритма является применение только в условиях внутренней калибровки. По этой причине было принято решение добавить возможность внешней калибровки в условиях полета изделия АФАР. На текущий момент проводится исследование и моделирование данного алгоритма.

Заключение

В данной статье упомянут ряд открытых проблем калибровки радиолокационных трактов антенных решеток, требуемых решения в целевых задачах моноимпульсной радиолокации. Показана необходимость применения динамической (адаптивной) калибровки с использованием опорных сигналов при выполнении первого этапа калибровки, с целью учета и компенсации деградации радиолиний передачи радиолокационных сигналов на вход ЦОС вследствие временных, температурных нестабильностей.

Приведено общее описание разработанного двухэтапного метода калибровки АФАР на основе ЦОС с использованием математических и компьютерных моделей; приведена блок-схема соответствующего двухэтапного алгоритма калибровки; кратко описано программное обеспечение (ПО), разработанное для алгоритма калибровки и реализованное на основе языка высокого уровня C++, с использованием программных средств Matlab, процессоров и ПЛИС; продемонстрированы результаты теоретического анализа работы метода калибровки с использованием разработанных моделей АФАР и ПО; показаны результаты экспериментального исследования работы метода калибровки АФАР с целью формирования суммарно-разностной ее ДН с использованием разработанного ПО и аппаратных лабораторных средств.

Отличительная особенность описываемого двухэтапного алгоритма заключается в разработанных алгоритмах, реализующих цифровой формат калибровки. Разработан программно-аппаратный комплекс (включая алгоритмы сигнальной обработки) с внедрением упомянутых в статье алгоритмов в программное обеспечение. Данный аппаратный комплекс полностью отработан и апробирован.

Литература

1. Воскресенский Д.И., Канащенков А.П. *Активные фазированные антенные решетки*. Радиотехника. 2004. 488 с.
2. Луковский М.А, Матвеев А.М. Сравнительный анализ методов калибровки каналов сигналов антенн моноимпульсной радиолокации. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.5>
3. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических спец. вузов*. Москва, Высшая школа. 1988. 432 с.
4. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. *Устройства СВЧ и антенны*. Под ред. Д.И. Воскресенского. Радиотехника. 2006. 376 с.
5. Кремер И.Я. О влиянии модулирующих (мультипликативных) помех на характеристики выходного сигнала оптимального приемника. *Радиотехника и электроника*. 1972. Т.17. №3. С.68-74.
6. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпухин В.И. *Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов*. Москва, Советское радио. 1972. 480 с.
7. Артющенко В.М., Воловач В.И. Обнаружение сигналов при воздействии мультипликативных помех на фоне аддитивного шума. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.13>
8. Вендик О.Г., Парнес М.Д. *Антенны с электронным движением луча (введение в теорию)*. Москва, Сайнс-Пресс. 2002. 232 с.

Для цитирования:

Луковский М.А., Матвеев А.М. Двухэтапный метод калибровки АФАР. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.4>