

На правах рукописи



Коротецкий Егор Валерьевич

**КАЛИБРОВКА ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК НА
ОТКРЫТЫХ ПОЛИГОНАХ**

Специальность: 2.2.14.

Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в научно-исследовательском отделе №3 Публичного акционерного общества «Радиофизика».

Научный руководитель: - **Денисенко Владимир Викторович**
кандидат физико-математических наук,
начальник научно-исследовательского отдела №3,
ПАО «Радиофизика»

Официальные оппоненты: - **Литвинов Олег Станиславович**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры Физика и кафедры Радиоэлектронные системы и комплексы, МГТУ имени Н.Э. Баумана

- **Гриднев Вячеслав Иванович**
кандидат технических наук, начальник лаборатории,
АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»

Ведущая организация: - ПАО «НПО «Алмаз»,
г. Москва, Ленинградский проспект, д. 80, корп. 16

Защита состоится «26» сентября 2023 года в «10:00» на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=171890

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Учёный совет МАИ.

Учёный секретарь диссертационного совета



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Неотъемлемой частью разработки и эксплуатации фазированных антенных решеток (ФАР) является процедура определения начальных электрических длин и амплитуд каналов ФАР, или начальных коэффициентов передачи (НКП) каналов. Эту процедуру принято называть калибровкой ФАР. Калибровка выполняется для учета технологического разброса НКП, а также для учета вариаций НКП при замене модулей ФАР, при изменении температуры и вследствие других факторов.

В настоящее время чаще всего используются бесконтактные коммутационные методы калибровки, основанные на различных алгоритмах управления фазовыми сдвигами и коэффициентами ослабления в тестируемых каналах ФАР. При каждом состоянии тестируемых каналов измеряется, для калибровки на прием, суммарный сигнал на выходе ФАР при облучении ее монохроматическим контрольным сигналом от калибровочной(юстировочной) антенны (КА), а НКП определяются путем обработки массивов измеренных данных. Калибровка передающей ФАР выполняется аналогично, при этом контрольный сигнал подается на вход ФАР, а суммарный сигнал измеряется по выходу КА. Существующие методы основаны на измерении как комплексного суммарного сигнала, так и измерении только его мощности (то есть на бесфазных измерениях). Организация измерительных полигонов для калибровки имеет прямое влияние на точность получаемых НКП. Под измерительным полигоном понимается совокупность оборудования, использующегося для калибровки, и область пространства в котором оно расположено. При калибровке в условиях безэховых камер (БЭК), на закрытом полигоне, его влияние на результаты минимально. Однако на открытых полигонах имеются факторы, негативно сказывающиеся на результатах:

1. Погрешность измерения мощности и фазы контрольного сигнала (при использовании бесфазных методов калибровки – только погрешность измерения мощности);
2. Погрешность определения положения КА относительно апертуры ФАР;
3. Погрешность, обусловленная попаданием в апертуру ФАР помеховых сигналов, возникающих вследствие рассеяния поля КА на неоднородностях, окружающих место проведения калибровки.

В работе рассмотрено влияние перечисленных факторов на погрешности определения НКП каналов ФАР и на её результирующую диаграмму направленности (ДН).

При калибровке крупноапертурных ФАР в условиях ограниченного пространства, например в БЭК, на транспортных средствах и т.д. бывают случаи, когда невозможно эффективно возбудить всю апертуру ФАР одной близко расположенной к ней КА. В этих случаях актуальна задача рационального разделения апертуры ФАР на секторы, каждый из которых калибруется независимо. После калибровки секторов в отдельности необходимо скалибровать секторы между собой. Оптимизация времени выполнения такой двухступенчатой процедуры является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Вопрос создания подхода для обеспечения калибровки ФАР на открытых полигонах за счет разработки алгоритмов прогнозной оценки результатов калибровки и методики калибровки ФАР по секторам ранее не затрагивался. Однако некоторые вопросы, связанные с обеспечением изме-

рений антенных устройств на открытых полигонах, были рассмотрены в ряде работ. В работах Бубнова Г.Г., Фурсова С.А., Цейтлина Н.М., Vurbergy R.A. даются общие рекомендации по минимизации отражений от подстилающей поверхности при измерениях антенн на открытых полигонах. В работах Шитикова А.М., Афанасенкова Ю.М. рассматривается вопрос калибровки ФАР с наличием источника рассеяния и калибровочной антенны в дальней зоне. В работах Россельс Н.А., Шишлова А.В., Шитикова А.М. представлен подход для калибровки ФАР по секторам. Показано, что для калибровки секторов между собой можно работать с сектором как с одним каналом, синхронно изменяя фазу во всех каналах, входящих в сектор. В работах Добычиной Е.М., Кольцова Ю.В. показана адаптация коммутационного метода калибровки к работе в составе системы управления ФАР в процессе эксплуатации.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования выбраны начальные комплексные коэффициенты передачи каналов ФАР, определяемые в результате калибровки. Предметом исследования – влияние ряда негативных факторов на результаты калибровки и алгоритм калибровки ФАР по секторам.

Целью диссертационной работы является решение задачи обеспечения калибровки ФАР на открытых полигонах за счет разработки алгоритмов прогнозной оценки результатов калибровки и алгоритма калибровки ФАР по секторам.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- проведение обзора методов калибровки ФАР и способов организации калибровочных процедур;
- определение влияния погрешности измерения мощности при калибровке коммутационным методом REV (Rotation of an Electric field Vector) на погрешность определения НКП;
- определение влияния погрешностей установки КА, находящейся в зоне Френеля ФАР, на фазовое распределение в апертуре и на ДН ФАР, формируемую после калибровки;
- определение влияния рассеяния поля на окружающих неоднородностях на результаты определения НКП и на ДН ФАР при различных расстояниях от КА и источника рассеянного поля до апертуры ФАР;
- разработка алгоритма калибровки ФАР по отдельным перекрывающимся секторам с последующим совмещением результатов и формированием массива НКП ФАР.

Научная новизна работы заключается в изложении нового научно обоснованного подхода для проведения калибровки ФАР на открытых полигонах, а именно:

1. Предложен алгоритм расчета погрешности калибровки каналов ФАР коммутационным методом REV в зависимости от погрешности измерения мощности контрольного сигнала при калибровке.
2. Предложен алгоритм расчета фазовой ошибки, возникающей в апертуре ФАР после калибровки с неточно установленной относительно апертуры ФАР юстировочной антенной.
3. Предложен алгоритм расчета амплитудно-фазовой ошибки, возникающей в апертуре калибруемой ФАР при наличии источника рассеяния в зоне Френеля ФАР.

4. Предложен алгоритм совмещения начальных коэффициентов передачи каналов при калибровке ФАР по секторам.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах анализа влияния ряда негативных факторов на начальные коэффициенты передачи каналов ФАР и разработанных алгоритмах прогнозной оценки результатов калибровки в таких условиях. А также в разработанном алгоритме калибровки ФАР по секторам.

Практическая значимость работы заключается в разработанном подходе для организации и проведения калибровки ФАР на открытых полигонах. Он позволяет предъявлять требования и определять конфигурацию измерительного полигона для калибровки ФАР. В частности, разработанный алгоритм совмещения начальных коэффициентов передачи каналов позволяет рационально разделить апертуру ФАР на секторы и выполнить её калибровку по секторам с последующим совмещением результатов в едином массиве НКП ФАР. Алгоритмы определения погрешностей калибровки позволяют провести: расчет ошибок калибровки в зависимости от погрешности измерения мощности контрольного сигнала, расчет допустимых ошибок установки КА относительно апертуры ФАР, оценку влияния рассеянных полей на результаты калибровки и ДН ФАР.

Личный вклад. Выводы основных теоретических соотношений получены при непосредственном участии автора. Автор лично занимался разработкой нового алгоритма калибровки ФАР по секторам. Программной реализацией предложенных алгоритмов, выполнением экспериментов.

Методология и методы исследований. Методы, используемые для решения поставленных в диссертации задач, основаны на теории ФАР, теории рядов, дифференциальном исчислении, теории вероятностей. Численные результаты, приведенные в работе, получены компьютерным моделированием с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных в математическом программном пакете MATLAB и средах программирования Rad Studio Delphi, Visual Studio C#. Экспериментальные результаты, представленные в работе, получены с помощью стандартных методов антенных измерений.

Достоверность. Достоверность результатов подтверждается соответствием результатов математического моделирования и результатов калибровки и измерений ФАР сантиметрового диапазона.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих научных конференциях: 10-й Международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2011» (Москва, 8 – 10 ноября 2011г.), на Международной конференции по теории и технике антенн (ICATT'13, Одесса, 15 – 20 сентября 2013г.), на 8-ой Международной конференции инженерии и телекоммуникаций (En&T-2021, Москва, 24 – 25 ноября 2021г.), на 20-й Международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2021» (Москва, 22 – 26 ноября 2021г.). Полученные результаты обсуждались на научно-технических семинарах Публичного акционерного общества «Радиофизика».

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в ПАО «Радиофизика» при калибровке крупноапертурных ФАР миллиметрового и сантиметрового диапазонов, что подтверждается актами о внедрении.

Публикации. Основные результаты исследований, проведенных при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 11 печатных работах, из них 6 статей в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, одна статья в издании, индексируемом Scopus. А также в тезисах докладов на 4-х научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 136 машинописных листах и состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, одного приложения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 52 рисунков и одной таблицы. Список использованных источников включает 57 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанный алгоритм определения погрешности калибровки каналов ФАР коммутационным методом калибровки REV позволяет оценивать погрешности определения начальных фаз каналов перед процедурой калибровки. В частности, при среднеквадратическом отклонении мощности измеряемого сигнала 0,05...0,11 дБ ошибка оценки составляет не более 10%.

2. Разработанный алгоритм расчета фазовой ошибки, возникающей в апертуре ФАР после калибровки с неточно установленной относительно апертуры ФАР юстировочной антенной, позволяет оценивать влияние результатов калибровки с неточно определенными линейными координатами расположения юстировочной антенны на диаграмму направленности ФАР. В частности, ошибка установки юстировочной антенны 3λ в продольном или поперечном направлении относительно плоскости апертуры ФАР при расположении юстировочной антенны на расстоянии размера апертуры от апертуры ФАР, приводит к искажению уровня первых боковых лепестков диаграммы направленности ФАР после калибровки на 3 дБ или 7 дБ, соответственно.

3. Калибровка ФАР по фазе с наличием рассеяния от окружающих неоднородностей при расположении источника рассеяния в зоне Френеля ФАР приводит к искажениям формы ДН ФАР, которые выражаются в формировании двух зеркально направленных сферических волн с амплитудами в 2 раза меньшими, чем амплитуда формируемой сферической волны после калибровки по фазе и амплитуде.

4. Разработанный алгоритм совмещения начальных коэффициентов передачи каналов при калибровке ФАР по секторам позволил исключить этап калибровки секторов между собой, то есть сократил временные затраты на калибровку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности разработки алгоритмов прогнозной оценки результатов калибровки и методики калибровки ФАР по секторам, сформулированы цели и задачи исследований, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, описана структура диссертации. Основное содержание работы заключено в трех главах.

Первая глава содержит обзор и анализ материалов отечественных и зарубежных источников по исследуемой тематике. Представлена классификация методов калибровки ФАР и аспекты ее проведения на открытых полигонах. Проанализирована степень проработки вопросов калибровки ФАР в литературе. Показано, что:

- в большинстве работ, посвященных оценке погрешностей коммутационных методов, рассматриваются только погрешности установки фазовращателей и аттенюаторов;
- влияние погрешности установки КА, а также влияние рассеяния поля КА на окружающих апертуру ФАР неоднородностях на погрешности определения НКП каналов ФАР рассмотрены только в случаях их расположения в дальней зоне ФАР;
- определение НКП каналов ФАР при калибровке ФАР по секторам выполняется не оптимальным образом, в два этапа измерений;
- комплексного подхода к организации стендов для калибровки ФАР не предложено.

На основании приведенного анализа сделаны выводы об актуальности решения задачи проведения калибровки ФАР на открытых полигонах за счет разработки алгоритмов прогнозной оценки результатов калибровки и калибровки ФАР по секторам.

Во второй главе в параграфе 2.1 приведены основные соотношения для коммутационного метода калибровки REV и произведена оценка погрешности калибровки этим методом, вызываемой погрешностью измерения мощности контрольного сигнала. Также рассмотрены погрешности калибровки, связанные с неточной установкой КА относительно апертуры ФАР, и погрешности, вызванные рассеянием поля КА на окружающих апертуру ФАР неоднородностях. Везде в работе при записи выражений для напряженности электрического поля в некоторой точке пространства полагается, что поляризационная эффективность равна единице.

Суть метода REV применительно к приемным ФАР заключается в следующем. ФАР облучается монохроматическим контрольным сигналом на рабочей частоте с помощью КА. Фазовращатель выбранного канала последовательно переключается во все фазовые состояния так, что фазовый сдвиг изменяется в пределах 360 градусов при постоянстве сигналов в остальных каналах. После каждого переключения измеряется мощность P_l [дБ] суммарного сигнала на выходе антенны с помощью анализатора цепей (измерение фазы сигнала при этом не требуется). По значениям P_l , измеренным для каждого фазового состояния с номером l , вычисляется НКП канала. Операция повторяется для всех каналов ФАР. Мощность суммарного сигнала, согласно теореме косинусов, может быть представлена как:

$$P_l = E_{test}^2 + E_{ref}^2 + 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0 - \Delta \cdot l), \quad (1)$$

где

Δ – дискрет ФВ; φ_0 – начальная (при $l = 0$) фаза в тестируемом канале.

В соотношении (1) участвуют модули комплексных сигналов \dot{E}_{test} и \dot{E}_{ref} . Поскольку при калибровке мощность P_l измеряется для каждого фазового состояния ФВ $l = 0, 1, \dots, L-1$, то (1) представляет собой систему из L уравнений с тремя неизвестными величинами: E_{test} , E_{ref} и φ_0 . Эта система записана в предположении, что амплитуда тестируемого канала E_{test} одинакова во всех состояниях ФВ, а дискрет переключения ФВ Δ одинаков при всех переключениях и составляет

$\Delta = 2\pi/L$. Из (1) видно, что величина P_l при приращении номера фазового состояния l в тестируемом канале изменяется по синусоиде [3]. Преобразуем систему уравнений (1) к виду:

$$P_l = A + B \cos(\Delta \cdot l) + C \sin(\Delta \cdot l), \quad (2)$$

где $l = 0, 1, \dots, L-1$, $A = E_{test}^2 + E_{ref}^2$; $B = 2E_{test}E_{ref} \cos \phi_0$; $C = 2E_{test}E_{ref} \sin \phi_0$.

Для системы (2) неизвестные величины A , B , C могут быть определены с помощью метода наименьших квадратов следующими соотношениями:

$$A = L^{-1} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} P_l, \quad B = 2L^{-1} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} P_l \cos(\Delta \cdot l), \quad C = 2L^{-1} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} P_l \sin(\Delta \cdot l). \quad (3)$$

Из (3) следует, что начальная фаза сигнала тестируемого канала выражается соотношением:

$$\phi_0 = \arctg(C/B). \quad (4)$$

Фаза в (4) определяется по отношению к опорному каналу. Точно так же, по отношению к опорному каналу, может быть выражена амплитуда:

$$\delta_0 = \frac{E_{test}}{E_{ref}} = \frac{\sqrt{A + \sqrt{B^2 + C^2}} - \sqrt{A - \sqrt{B^2 + C^2}}}{\sqrt{A + \sqrt{B^2 + C^2}} + \sqrt{A - \sqrt{B^2 + C^2}}}. \quad (5)$$

Абсолютные погрешности определения начальной фазы сигнала (4) и относительные погрешности определения начальной амплитуды (5), являющиеся сложными функциями от A , B и C , определяются следующими соотношениями:

$$\Delta \phi_0 = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial \phi_0}{\partial B} \right| \cdot \Delta B \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial \phi_0}{\partial C} \right| \cdot \Delta C \right)^2}, \quad (6)$$

$$\Delta \delta_0 = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial \delta_0}{\partial A} \right| \cdot \Delta A \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial \delta_0}{\partial B} \right| \cdot \Delta B \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial \delta_0}{\partial C} \right| \cdot \Delta C \right)^2}, \quad (7)$$

где $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ - погрешности определения сумм A, B, C из (3).

Оценим погрешность для суммы A, B, C . Из теории вероятности известно, что ошибка суммы независимых величин равна корню квадратному из суммы квадратов ошибок слагаемых. Тогда:

$$\Delta A = \frac{\sqrt{L}}{L} \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} \Delta P_l^2} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{L}}, \quad \Delta B \approx \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{2}{L}}, \quad \Delta C \approx \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{2}{L}}, \quad (8)$$

где ε - абсолютная погрешность измерения мощности.

Для вычисления частных производных в (6) продифференцируем (4):

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial B} = -\frac{C}{B^2 \left(1 + \frac{C^2}{B^2} \right)}, \quad \frac{\partial \phi_0}{\partial C} = \frac{1}{B \left(1 + \frac{C^2}{B^2} \right)}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражения для B и C из (3), и проводя расчеты фазовой погрешности по (6), получим:

$$\Delta \phi_0 = \frac{\sqrt{L} \varepsilon}{\sqrt{2} \sqrt{\left(\sum_{l=0}^{L-1} P_l \cos(\Delta l) \right)^2 + \left(\sum_{l=0}^{L-1} P_l \sin(\Delta l) \right)^2}}. \quad (10)$$

Относительная погрешность определения амплитуды канала $\Delta \delta_0$ рассчитывается на основе соотношений (5), (7). В предположении $\frac{E_{test}}{E_{ref}} \ll 1$ получим:

$$\Delta\delta_0 = \frac{\sqrt{2L\varepsilon}}{\sum_{l=0}^{L-1} P_l + \sqrt{\left(\sum_{l=0}^{L-1} P_l\right)^2 - 4\left(\left(\sum_{l=0}^{L-1} P_l \cos(\Delta l)\right)^2 + \left(\sum_{l=0}^{L-1} P_l \sin(\Delta l)\right)^2\right)}}. \quad (11)$$

В общем случае, погрешность измерения мощности (ε в (10), (11)) складывается из систематической погрешности и случайной. Систематическая погрешность оказывает слабое влияние на результаты калибровки методом REV, т.к. добавляется как к опорному каналу, так и к тестируемому. Случайная погрешность зависит от шумов в измерительном приборе и в измеряемом объекте. Её можно исключить многократными измерениями, но это требует значительных временных затрат. В диссертации в качестве погрешности измерения относительной мощности рассматривается именно случайная погрешность. Величина погрешности ε может быть определена напрямую, путем проведения многократных прямых измерений перед калибровкой с последующим вычислением СКО.

Ниже приводятся данные для ошибок калибровки, полученные в результате моделирования и измерений двух различных ФАР. На Рисунке 1 представлены результаты численного эксперимента. Расчет проведен для математической модели восьмиканальной линейной ФАР с изотропными излучателями, шагом излучателей $\lambda/2$ и шестиразрядными ФВ. Синей линией представлены результаты расчета погрешностей определения начальных коэффициентов передачи каналов ФАР, вычисленные непосредственно по результатам 10000 процедур калибровки методом REV с помощью соотношения (4) при пяти значениях ε , выраженных в децибелах. Красной линией обозначены погрешности, вычисленные по формулам (10), (11). Полученные оценки погрешностей были сопоставлены с погрешностями, полученными при калибровке приемной ФАР L-диапазона для мобильной станции системы спутниковой связи и приемной ФАР X-диапазона, показанными на Рисунке 2. Антенна L-диапазона содержит 120 каналов с шестиразрядными фазовращателями. Размер апертуры антенны - $10\lambda \times 4\lambda$ (λ – длина волны). Антенна X-диапазона содержит 256 каналов также с шестиразрядными фазовращателями. Размер апертуры антенны - $8\lambda \times 9\lambda$. В ФАР L-диапазона работа велась с группой из 14 каналов, а в ФАР X-диапазона калибровались 16 каналов. Для определения погрешностей определения НКП каналов ФАР калибровка одной и той же группы каналов производилась 10 раз.

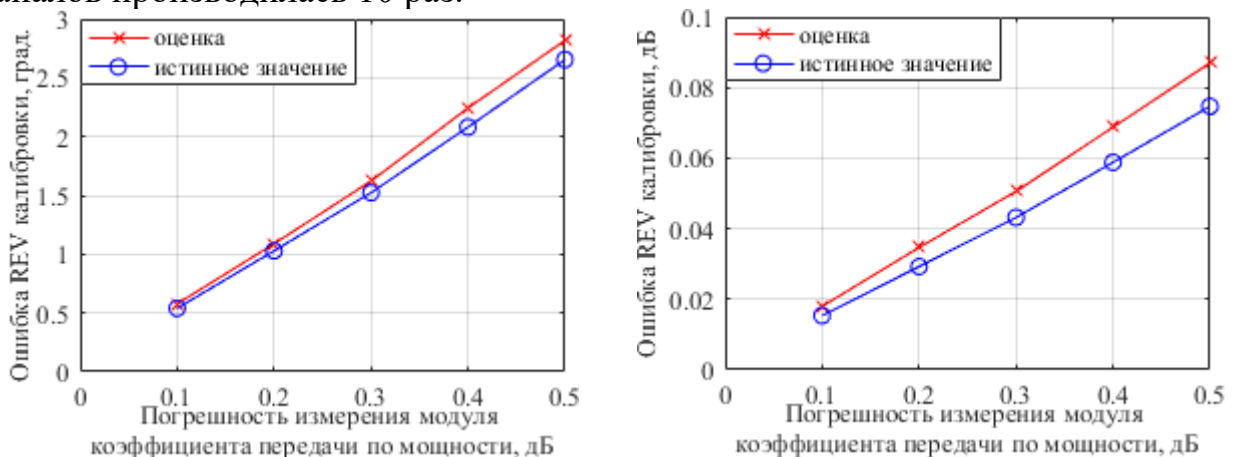


Рисунок 1 - Абсолютные погрешности определения начальных фаз и амплитуд каналов при калибровке методом REV. Красная линия с крестом – расчет по ф.(10), (11) из диссертационного исследования

По этой выборке вычислялась среднеквадратическая ошибка (СКО) начальной фазы для каждого канала. Полученная ошибка сравнивалась с оценкой, вычисленной по (10). Результаты эксперимента показаны на Рисунке 3, где представлены графики вычисленных среднеквадратических ошибок начальных фаз каналов после калибровки, а также графики оценок погрешностей начальных фаз, рассчитанных по (10).

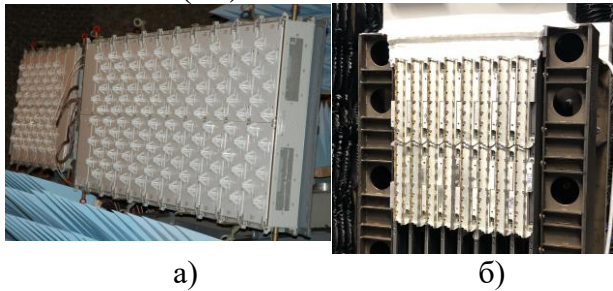


Рисунок 2 - а) ФАР L -диапазона на измерительном стенде в БЭК. Приемная часть – на переднем плане. б) Макет ФАР X -диапазона на измерительном стенде в БЭК

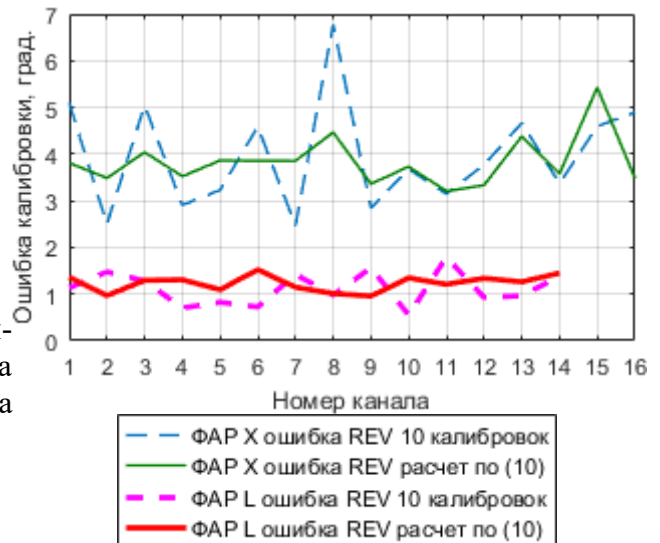


Рисунок 3 - Результаты расчета ошибки определения начальных фаз каналов приемных ФАР L , X -диапазонов

Погрешность измерения мощности для 10000 замеров перед калибровкой ФАР L -диапазона составила 0.05 дБ, а при работе с ФАР X -диапазона 0.11 дБ. Из Рисунка 5 можно видеть, что значения СКО фаз каналов, полученные в эксперименте, близки к значениям фазовой погрешности, определяемой оценкой (10). Средние значения ошибок определения начальных фаз для группы каналов ФАР L -диапазона после 10 калибровок и после расчета по (10) составили 1.1 и 1.2 градуса, а для ФАР X -диапазона 4 и 3.8 градуса, соответственно.

В параграфе 2.2 дана оценка погрешности калибровки ФАР, вызванной неточной установкой КА в заданное положение.

Рассмотрим погрешность калибровки, связанную со смещением КА из заданной точки, на примере одномерной (линейной) ФАР (Рисунок 4).

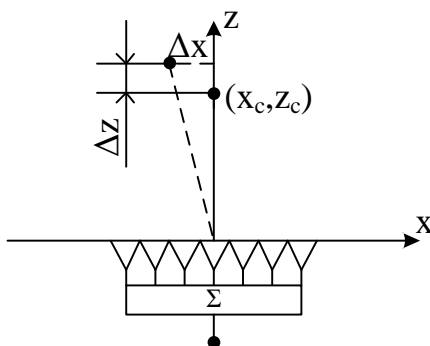


Рисунок 4 - Смещение калибровочной антенны из заданной точки x_c, z_c

Система координат (x, y) выбрана так, что фазовые центры излучателей расположены на оси x . Их положения обозначим x_i . Начало координат совмещено с центром апертуры ФАР. КА расположена в точке с координатами $(x = x_c = 0, z = z_c)$. Предположим, что калибровочная антенна смещена из этой точки в точку с координатами $(x_c - \Delta x, z_c + \Delta z)$, а расчет фазового распределения выполнен по формулам, не учитывающим смещения калибровочной антенны, и потому НКП каналов определяются с погрешностью.

Рассмотрим случай, когда КА смещена вдоль апертуры ФАР, тогда $\Delta z = 0, \Delta x \neq 0$. Фазовая ошибка по апертуре, в предположении $\Delta x \ll z_c$, описывается следующим образом:

$$\Delta\varphi(x_i) = k \left[\sqrt{(x_i - \Delta x)^2 + z_c^2} - \sqrt{x_i^2 + z_c^2} \right] \approx -kx_i \frac{\Delta x}{z_c} \left(1 - \frac{x_i^2}{2z_c^2} + \dots \right). \quad (12)$$

Из (12) видно, что в функции распределения фазовой ошибки по апертуре присутствует линейный член, обеспечивающий в первом приближении отклонение луча на угол, равный $\arcsin(\Delta x / z_c)$, а также члены более высоких порядков, искажающие форму отклоненного луча. В (12) показан только член, формирующий дополнительный кубический набег фазы по апертуре. При небольших размерах апертуры он является определяющим при вычислении погрешности:

$$\Delta\varphi(x_i) = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \frac{x_i^3}{2z_c^3}, \text{ где } \lambda - \text{длина волны излучения.} \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда КА смещена перпендикулярно апертуре ФАР, то есть $x_c = 0, z = z_c, \Delta x = 0, \Delta z \neq 0$. Тогда, фазовая ошибка по апертуре, в предположении $\Delta z \ll z_c$, описывается следующим выражением:

$$\Delta\varphi(x_i) = \pi \frac{\Delta z}{\lambda} \frac{x_i^2}{z_c^2}. \quad (14)$$

Таким образом, после калибровки ФАР поперечные смещения КА приводят к линейным и кубическим фазовым ошибкам в НКП каналов, а продольные смещения – к квадратичным фазовым ошибкам определения фаз НКП. Влияние квадратичных и кубических фазовых ошибок в апертуре на форму ДН антенны хорошо известно и описано в литературе (Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терёшин О.Н. Антенны УКВ. М.: Связь. 1977. С. 147-155).

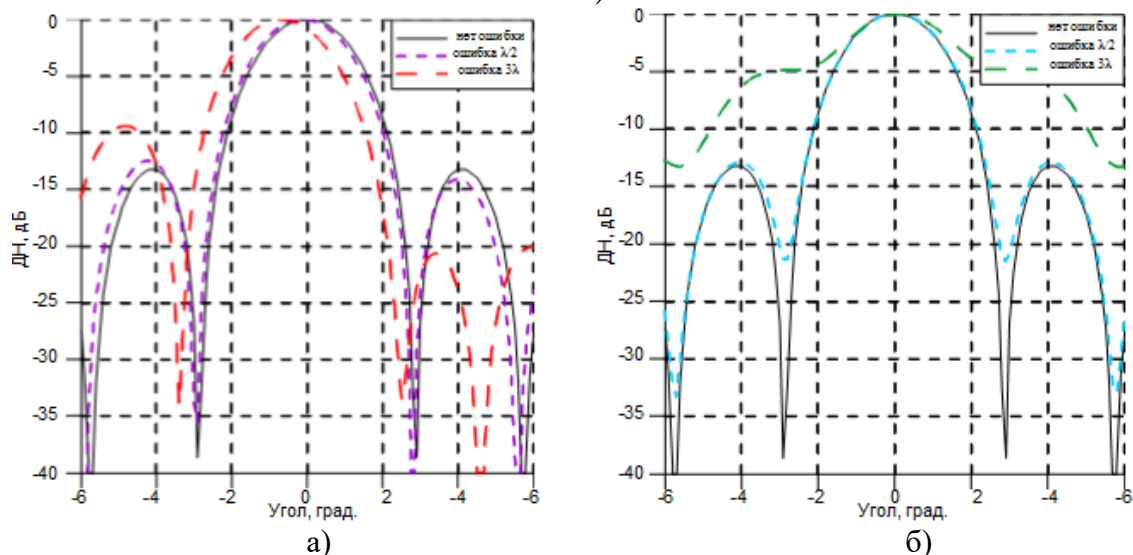


Рисунок 5 - ДН ФАР, получаемые после калибровки при наличии ошибки установки калибровочной антенны относительно заданного положения: (а) - поперечное смещение КА относительно оси антенны; (б) - продольное смещение КА относительно оси антенны

На Рисунке 5 приведены результаты моделирования ДН линейной ФАР, состоящей из 101 излучателя с изотропными ДН. Шаг решетки $\lambda/2$. Калибровка ФАР выполнена с помощью КА, установленной с погрешностями, равными $\lambda/2$ и 3λ . Из Рисунка 5б) видно, что влияние продольного смещения КА (и соответ-

ствующей квадратичной фазовой ошибкой) выражается в "заплывании" нулей ДН и подъеме уровня боковых лепестков. Поперечное смещение КА относительно оси антенны (и соответствующая кубическая фазовая ошибка) вызывает перекокс ДН с небольшим смещением её максимума от направления фазирования. На Рисунке 5а) показана ДН с учетом кубической фазовой ошибки. Сдвиг, вызванный линейной фазовой ошибкой, присутствующей в (12), на графике не показан. Искажения формы ДН при погрешности установки КА менее одной длины волны относительно невелики, и в ряде задач ими можно пренебречь. Основное внимание следует уделять смещению максимума ДН от направления фазирования, поскольку оно значительно сказывается на точности установки луча ФАР.

Теоретические результаты сравнивались с экспериментальными, полученными при калибровке крупноапертурной приемной ФАР S-диапазона. Антенна состоит из 512 каналов с шестизрядными фазовращателями в каждом канале. Размер апертуры антенны - $31\lambda \times 31\lambda$. При калибровке ФАР были рассмотрены смещения КА как параллельно апертуре ФАР, так и перпендикулярно ей на $\lambda/2$ и 3λ в обоих направлениях. КА находилась на расстоянии размера апертуры от ФАР. При смещении положения КА вдоль апертуры ФАР последующие измерения ДН производились с поворотом антенны на угол, компенсирующий линейное слагаемое в (12). На Рисунке 6 представлены измеренные ДН после калибровки с указанными выше погрешностями установки КА вдоль апертуры и по нормали к апертуре, соответственно. Измеренные ДН хорошо согласуются с расчетными ДН (Рисунок 5). Можно видеть, что при смещении КА на 3λ в продольном или поперечном направлении относительно апертуры ФАР, искажения первых боковых лепестков ДН составили 3 дБ или 7 дБ соответственно.

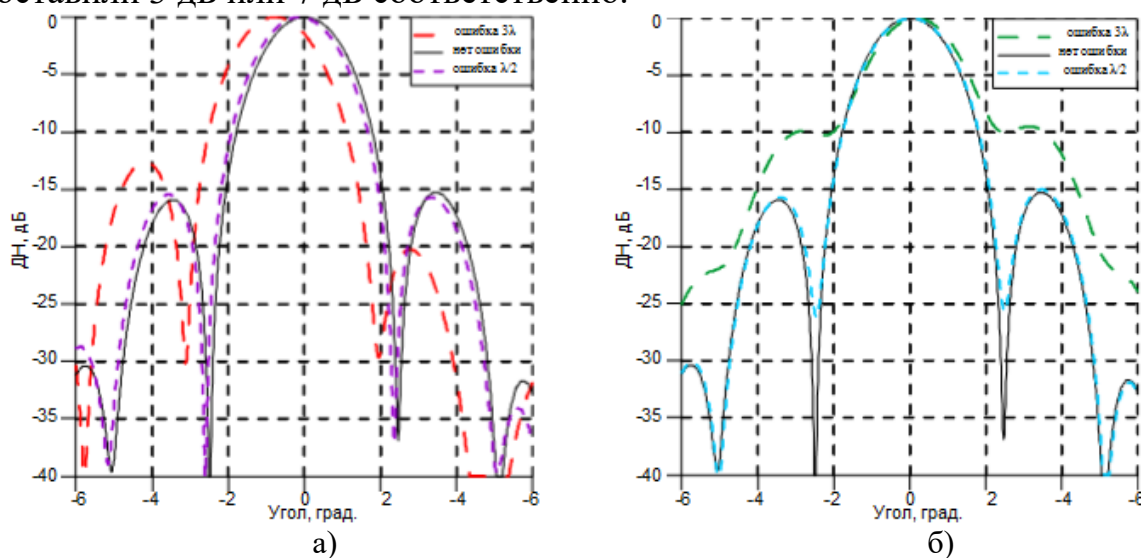


Рисунок 6 - Измеренные ДН после калибровки при наличии погрешности установки КА:
(а) – КА смещена вдоль апертуры, (б) – КА смещена по нормали к апертуре

В параграфе 2.3 рассмотрена калибровка ФАР при наличии рассеянных полей.

При калибровке ФАР в её апертуру, наряду с первичной (прямой) волной от КА, попадают вторичные волны, возникающие при рассеянии первичной волны КА на подстилающей поверхности (в помещении это пол, стены, потолок), а также на окружающих предметах. Калибровка при наличии рассеянных полей приводит к искажению формы ДН ФАР. Случай, когда КА и источники рассеяния находятся в дальней зоне ФАР, рассмотрен ранее (Афанасенков Ю.М., Шитиков

А.М. Калибровка фазированных антенных решеток в условиях помех // Радиотехника. 2010. №4. С. 46-51). В настоящей работе рассмотрены случаи расположения КА в дальней зоне и зоне Френеля, а источника рассеяния в зоне Френеля калибруемой ФАР.

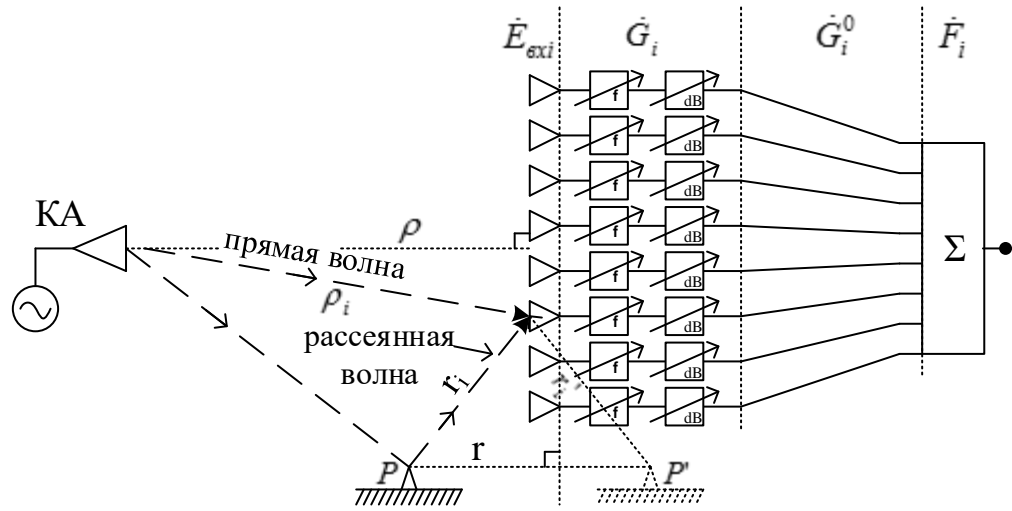


Рисунок 7 - Схема калибровки ФАР на прием с помощью КА при наличии в апертуре поля от рассеивателя

Обычно при калибровке предполагается, что КА создает в апертуре ФАР поле, формирующее на входах каналов известное амплитудно-фазовое распределение, соответствующее полю сферической волны КА¹:

$$\dot{E}_{exi} = \dot{a}_i \dot{b}_i e^{-jk\rho_i} / \rho_i, \quad (15)$$

где ρ_i – расстояние от КА до i -го излучателя; \dot{a}_i – ДН КА в направлении i -го излучателя; \dot{b}_i – ДН i -го излучателя в направлении КА.

На входе сумматора ФАР (Рисунок 7) комплексные амплитуды сигналов \dot{F}_i определяются соотношением:

$$\dot{F}_i = \dot{E}_{exi} \dot{G}_i \dot{G}_i^0, \quad (16)$$

где:

\dot{G}_i – известные составляющие комплексных коэффициентов передачи каналов, управляемые с помощью фазовращателей и аттенюаторов;

\dot{G}_i^0 – НКП, т.е. начальные составляющие коэффициентов передачи каналов.

При калибровке происходит выделение сигнала каждого канала ФАР путем выключения остальных каналов или математической обработки и получение НКП. Т.е. в результате калибровки, из \dot{F}_i (16) будут получены НКП, \dot{G}_i^0 . Эту операцию можно записать как деление правой части выражения (16) на $\dot{E}_{exi} \dot{G}_i$:

$$\dot{G}_i^0 = \frac{\dot{F}_i}{\dot{E}_{exi} \dot{G}_i}. \quad (17)$$

Если при калибровке в апертуру ФАР наряду с первичной волной от КА (15) попадает рассеянная волна с комплексной амплитудой \dot{B}_i , то комплексные амплитуды на входе каналов ФАР имеют вид:

¹ Здесь и далее зависимость напряженности электрического поля от времени, а также нормировочный коэффициент и зависимость фазы от расстояния - опускаются

$$\dot{E}'_{exi} = \dot{A}_{exi} + \dot{B}_i. \quad (18)$$

Наличие рассеивателя и, следовательно, комплексная амплитуда \dot{B}_i , в общем случае неизвестны и в алгоритме калибровки не учитываются. Поэтому НКП все равно будут получены по (17) делением на $\dot{E}'_{exi} \dot{G}_i$.

Структура рассеянного поля, попадающего в апертуру ФАР, существенно зависит от формы, материала и положения рассеивателя относительно КА и ФАР. Предположим, что рассеиватель создает сферическую волну с центром в точке P (Рисунок 7). Комплексную амплитуду рассеянной волны на входе i -го канала можно представить в виде:

$$\dot{B}_i = \dot{\beta} \cdot \frac{\dot{a}'_i \dot{b}'_i}{r_i} \cdot e^{-jkr_i}, \quad (19)$$

где $\dot{\beta}$ – комплексный коэффициент, указывающий на соотношение комплексных амплитуд первичной и рассеянной волн на рассеивателе; r_i – расстояние от точки рассеяния P до i -го излучателя; \dot{a}'_i – ДН рассеивателя в направлении i -го излучателя; \dot{b}'_i – ДН i -го излучателя в направлении рассеивателя.

Далее будем использовать только амплитудные ДН рассеивателя и излучателей в направлении рассеивателя: $|\dot{a}'_i|, |\dot{b}'_i|$, рассматривая их как коэффициенты ослабления. Так же, как коэффициент ослабления, будем рассматривать и $|\dot{\beta}|$.

В диссертации рассмотрены два варианта расположения КА и рассеивателя: 1) КА находится в дальней зоне ФАР, а рассеиватель – в зоне Френеля ФАР, 2) КА и источник рассеяния расположены в зоне Френеля ФАР. Для обоих вариантов рассмотрены как ФАР с амплитудно-фазовым управлением в каналах, так и ФАР с управлением только фазами.

НКП, при наличии рассеянного поля в апертуре ФАР, запишутся по (18) в виде:

$$\hat{G}_i^0 = \dot{G}_i^0 \left(1 + \frac{\dot{B}_i}{\dot{E}'_{exi}} \right). \quad (20)$$

Таким образом, в результате работы алгоритмов калибровки будут получены \hat{G}_i^0 (20), не равные истинным НКП \dot{G}_i^0 .

При диаграммоформировании после калибровки, для установки луча по нормали к апертуре, в каналах требуется сформировать равноамплитудное и синфазное распределение, т.е. необходимо выполнить условие:

$$\dot{F}_i = \dot{G}_i \dot{G}_i^0 \equiv 1. \quad (21)$$

Для выполнения (21), управляемые амплитуды и фазы в каналах ФАР должны компенсировать разброс НКП. Для этого, \dot{G}_i следует вычислять в соответствии с формулой:

$$\dot{G}_i = \left(\dot{G}_i^0 \right)^{-1}. \quad (22)$$

Обозначим за $\dot{E}'_{блх}$ поле, которое будет сформировано в дальней зоне ФАР (Рисунок 7) после калибровки на прием в случае диаграммоформирования этой же ФАР на передачу, полагая тракты на прием и передачу идентичными. $\dot{E}'_{блх}$ запишется как:

$$\dot{E}_{\text{свix}}(\mathbf{R}) = \frac{e^{-jkR}}{R} \sum_i \dot{a}(\theta, \varphi) \dot{F}_i e^{j(\mathbf{k}, \mathbf{r}_i)}, \quad (23)$$

где k – волновое число; \mathbf{R} – радиус-вектор от начала сферической системы координат, связанной с апертурой ФАР, до точки наблюдения в дальней зоне ФАР; R – расстояние от начала сферической системы координат, связанной с апертурой ФАР, до точки наблюдения в дальней зоне ФАР; $\dot{a}(\theta, \varphi)$ – обобщенная ДН элемента ФАР в направлении θ, φ ; $\mathbf{k} = k\mathbf{R}/R$, волновой вектор; \mathbf{r}_i – радиус-вектор от начала сферической системы координат, связанной с апертурой ФАР, до i -го элемента ФАР.

В (23) выражение под знаком суммы является ДН ФАР. Обозначим ее за \dot{A} и в дальнейшем в качестве результата диаграммоформирования в дальней зоне будем рассматривать только ее:

$$\dot{A}(\theta, \varphi) = \dot{a}(\theta, \varphi) \sum_i \dot{F}_i e^{j(\mathbf{k}(\theta, \varphi), \mathbf{r}_i)}. \quad (24)$$

Вариант 1. Калибровочная антенна расположена в дальней зоне ФАР, а рассеиватель – в зоне Френеля ФАР.

Если КА расположена в дальней зоне в направлении нормали, то $\dot{E}_{\text{свix}} = \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkR}}{R}$ и НКП (20) равны:

$$\hat{G}_i^0 = \dot{G}_i^0 \left(1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkr_i} / (|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkR} \cdot r_i) \right). \quad (25)$$

В соответствии с (22), для формирования луча ФАР в направлении нормали получим следующие управляемые коэффициенты передачи:

$$\dot{G}_i = \frac{1}{\dot{G}_i^0 \left(1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkr_i} / (|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkR} \cdot r_i) \right)}. \quad (26)$$

Амплитудно-фазовое управление в каналах ФАР.

Определим комплексные амплитуды сигналов \dot{F}_i на выходах каналов ФАР (на входах сумматора), если управляемые амплитуды и фазы установлены в соответствии с (26). Подставляя (26) в (21), получим:

$$\dot{F}_i = \dot{G}_i \dot{G}_i^0 = \frac{1}{1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkr_i} / (|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jkR} \cdot r_i)}. \quad (27)$$

Воспользовавшись при условии малости отношения амплитуд рассеянной волны и первичной волны КА $|\dot{\beta} \cdot R / r_i| \ll 1$ разложением в ряд $\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 \dots$, преобразуем (27):

$$\dot{F}_i = 1 + \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| R |\dot{\beta}| \cdot e^{j(-kr_i + \pi)}}{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| r_i e^{-jkR}}. \quad (28)$$

Из (28) ДН ФАР, с учетом (24):

$$\dot{A}(\theta, \varphi) = \dot{a}(\theta, \varphi) \sum_i e^{j(\mathbf{k}(\theta, \varphi), \mathbf{r}_i)} + \dot{a}(\theta, \varphi) \frac{R}{e^{-jkR}} \sum_i \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| |\dot{\beta}| \cdot e^{j(-kr_i + \pi)}}{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| r_i} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \varphi), \mathbf{r}_i)}. \quad (29)$$

Таким образом, ДН ФАР состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое соответствует плоской волне, а второе – сферической волне с центром в точке P' , яв-

ляющейся зеркальным изображением P относительно плоскости апертуры ФАР. Т.к. фазы сферической волны в (19) и (29) равны с точностью до константы, она виртуально продолжает распространение в ту же сторону от реального источника рассеяния ФАР после проведения калибровки. Т.е. будто отражаясь от апертуры ФАР и распространяясь от изображения источника рассеяния с центром в точке P' . После калибровки и формирования ДН на передачу, сферическая волна при условии $\dot{\beta} \ll 1$ ослабнет и влияние на ДН в области главного луча практически не окажет. Возможно влияние на ДН только в дальних боковых лепестках, в зоне, где энергетика основной волны слабая.

Фазовое управление в каналах ФАР.

Если в каналах ФАР управляемыми являются только фазы, то амплитуды в каналах не изменятся после калибровки. Это значит, что нужно отнормировать вводимый коэффициент передачи к единице. Тогда (26) примет вид:

$$\hat{G}_i = \frac{|\dot{G}_i^0 (1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jk r_i} / (|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR} \cdot r_i))|}{|\dot{G}_i^0 (1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jk r_i} / (|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR} \cdot r_i))|}. \quad (30)$$

И вместо (27), комплексные амплитуды на выходах каналов будут определяться выражением:

$$\dot{F}_i = |\dot{G}_i^0| \frac{\left| \left(1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jk r_i} / (|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR} \cdot r_i) \right) \right|}{1 + |\dot{\beta}| \cdot R \cdot |\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| e^{-jk r_i} / (|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR} \cdot r_i)}. \quad (31)$$

Вычислим модуль комплексного числа в числителе (31) и разложим полученное выражение в ряд по малым $\dot{\beta}$. Отбрасывая степени $\dot{\beta}$ больше единицы, получим:

$$\dot{F}_i = |\dot{G}_i^0| \left(1 - \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| R |\dot{\beta}|}{2 r_i |\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR}} e^{jk r_i} + \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| R |\dot{\beta}|}{2 r_i |\dot{a}_i| |\dot{b}_i| e^{-jkR}} e^{-jk r_i} \right). \quad (32)$$

Из (32) ДН ФАР, с учетом (24):

$$\begin{aligned} \dot{A}(\theta, \phi) = & \dot{a}(\theta, \phi) \sum_i |\dot{G}_i^0| e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)} - \dot{a}(\theta, \phi) \frac{R}{e^{-jkR}} \frac{|\dot{\beta}|}{2} \sum_i |\dot{G}_i^0| \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i|}{r_i |\dot{a}_i| |\dot{b}_i|} e^{jk r_i} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)} + \\ & + \dot{a}(\theta, \phi) \frac{R}{e^{-jkR}} \frac{|\dot{\beta}|}{2} \sum_i |\dot{G}_i^0| \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i|}{r_i |\dot{a}_i| |\dot{b}_i|} e^{-jk r_i} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)}. \end{aligned} \quad (33)$$

Как следует из (33), при калибровке с помощью КА, расположенной в дальней зоне ФАР в присутствии рассеивателя в зоне Френеля ФАР и при чисто фазовом управлении, ДН ФАР складывается из трех составляющих: основной и двух дополнительных, определяющих систематическую ошибку. Одно из дополнительных слагаемых соответствует сферической волне, идущей от рассеивателя в точке P , другое – сферической волне, идущей от изображения рассеивателя P' . Амплитуды этих двух слагаемых по меньшей мере на 3 дБ ниже, чем амплитуда дополнительного слагаемого в виде сферической волны при амплитудно-фазовом управлении.

Вариант 2. Калибровочная антенна и рассеиватель расположены в зоне Френеля ФАР.

Амплитудно-фазовое управление в каналах ФАР.

Аналогично рассуждениям выше (из Варианта 1) ДН ФАР запишется:

$$\dot{A}(\theta, \varphi) = \dot{a}(\theta, \varphi) \sum_i e^{j(\mathbf{k}(\theta, \varphi), \mathbf{r}_i)} + \dot{a}(\theta, \varphi) \sum_i \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| \rho_i |\dot{\beta}|}{|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| r_i} e^{j(k\rho_i - kr_i + \pi)} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \varphi), \mathbf{r}_i)}. \quad (34)$$

Как правило, рассеиватель расположен ближе к апертуре ФАР, чем КА, поэтому второе слагаемое в (34), обуславливающее систематическую погрешность, пропорционально $\rho_i / r_i > 1$ и больше влияет на формируемую ДН ФАР, чем второе слагаемое в (29), пропорциональное $1/r_i < 1$.

Фазовое управление в каналах ФАР.

Аналогично рассуждениям выше (из Варианта 1) ДН ФАР запишется:

$$\begin{aligned} \dot{A}(\theta, \phi) = & \dot{a}(\theta, \phi) \sum_i |\dot{G}_i^0| e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)} + \dot{a}(\theta, \phi) \frac{|\dot{\beta}|}{2} \sum_i |\dot{G}_i^0| \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| \rho_i}{|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| r_i} e^{(jkr_i - jk\rho_i)} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)} - \\ & - \dot{a}(\theta, \phi) \frac{|\dot{\beta}|}{2} \sum_i |\dot{G}_i^0| \frac{|\dot{a}'_i| |\dot{b}'_i| \rho_i}{|\dot{a}_i| |\dot{b}_i| r_i} e^{-(jkr_i - jk\rho_i)} e^{j(\mathbf{k}(\theta, \phi), \mathbf{r}_i)}. \end{aligned} \quad (35)$$

Выражение (35) аналогично выражению (33). Оно содержит три слагаемых: основное и два дополнительных, определяющих погрешность калибровки. Эти слагаемые соответствуют сферическим волнам, исходящим от рассеивателя и его изображения. Геометрооптическая структура волн, определяющих систематическую ошибку при калибровке ФАР при наличии рассеивателя P , показана на Рисунке 8. При формировании ДН после калибровки в апертуре ФАР с амплитудно-фазовым управлением наряду с плоской волной формируется сферическая волна с мнимым фокусом P' , ограниченная лучами AA' и BB' (Рисунок 8а). Чем ближе источник рассеяния P к апертуре AB , тем шире сектор углов излучения этой сферической волны. При удалении рассеивателя P от апертуры ФАР сектор излучения сферической волны сужается и в пределе становится нулевым, что соответствует участку плоской волны.

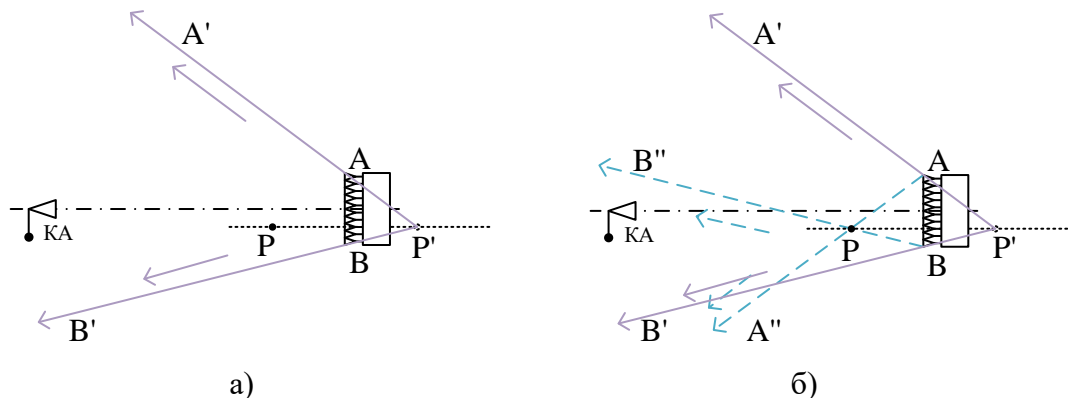


Рисунок 8 - Геометрооптические лучи волн при калибровке ФАР при наличии рассеивателя: а) – амплитудно-фазовое управление в каналах ФАР; б) – управление только фазами в каналах ФАР

При формировании ДН после калибровки в апертуре ФАР только с фазовым управлением наряду с плоской волной формируется две сферические волны (Рисунок 8б): первая – волна с мнимым фокусом P' , ограниченная лучами AA' и BB' ,

вторая – волна с действительным фокусом P , ограниченная лучами AA'' и BB'' . Чем ближе источник рассеяния P к апертуре AB , тем шире секторы углов излучения обеих сферических волн. При удалении рассеивателя P от апертуры ФАР секторы излучения этих волн сужаются и в пределе получают два участка плоских волн.

На Рисунке 9 показаны ДН систематических погрешностей, то есть добавок к ДН ФАР, возникающих при наличии источников рассеяния для линейной ФАР с амплитудно-фазовым (а) и фазовым (б) управлением. ФАР состоит из 101 всенаправленного излучателя, расположенных с шагом $\lambda/2$. Источник рассеяния P в дальней зоне и зоне Френеля расположен в направлении первого бокового лепестка ФАР под углом -1.7° от оси ФАР. Амплитуда рассеянного сигнала $|\beta| = -13.2$ дБ принята равной амплитуде первого бокового лепестка ФАР. КА в зоне Френеля расположена на расстоянии четырех размеров апертуры ФАР, а источник рассеяния – на расстоянии одного размера апертуры. Из Рисунка 9а) видно, что систематическая погрешность при амплитудно-фазовом управлении представляет собой ДН, формируемую излучателями в апертуре при возбуждении их сферической волной с мнимым фокусом P' . При приближении рассеивателя P к апертуре ФАР, сектор углов, в котором излучается поле, расширяется, а его амплитуда снижается. С приближением КА к апертуре ФАР амплитуда поля увеличивается, а сектор углов, в котором излучается поле, сужается, т.к. фазовый фронт уплощается в соответствии с выражением $e^{jk\rho_i - jkz_i}$. При расположении рассеивателя в дальней зоне ФАР, ДН систематической погрешности имеет максимум в направлении, зеркальном относительно нормали к апертуре. Из Рисунка 9б) видно, что при чисто фазовом управлении ФАР, систематическая погрешность является суммой двух сферических волн. В угловом секторе, где эти волны интерферируют, ее ДН осциллирует. В направлении КА рассматриваемые волны излучаются в противофазе, поэтому суммарная ДН погрешности в этой области углов имеет провал.

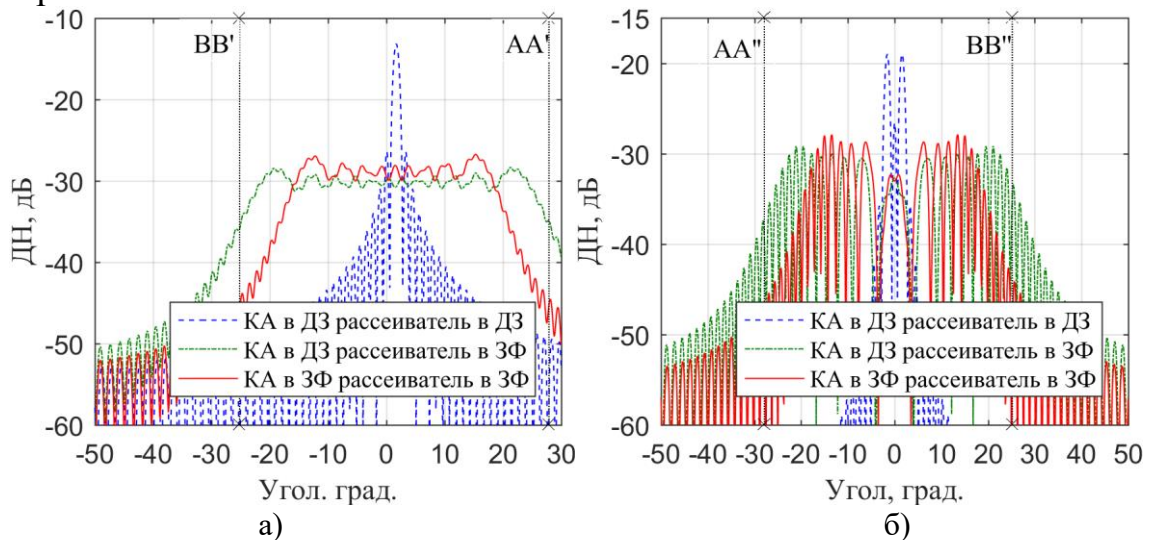


Рисунок 9 - Систематические погрешности ДН ФАР, возникающие после калибровки ФАР из-за наличия рассеивателя при амплитудно-фазовом (а) и фазовом (б) управлениях. На этом рисунке и далее: ДЗ – дальняя зона, ЗФ – зона Френеля

На Рисунках 9а) и 9б) в соответствии с обозначениями на Рисунке 8, показан сектор формирования сферической волны при амплитудно-фазовом управлении BB' -

AA', и сектор формирования одной из двух сферических волн при фазовом управлении AA''-BB''.

ДН рассматриваемой линейной ФАР после калибровки без рассеивателя и с рассеивателем показаны на Рисунке 10.

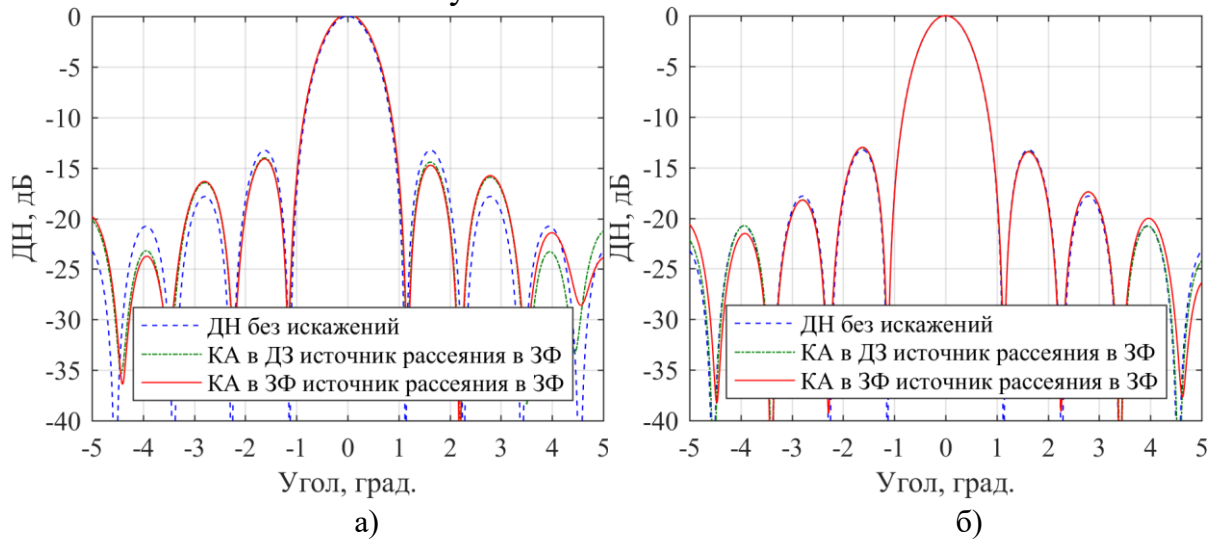


Рисунок 10 - ДН ФАР после калибровки при наличии источника рассеяния в сравнении с неискаженной ДН ФАР при амплитудно-фазовом (а) и фазовом (б) управлении

Из Рисунков 10а) и 10б) видно, что при выбранных положении рассеивателя и значении коэффициента рассеяния, ошибка формирования максимума первого бокового лепестка ДН составляет 1.7 дБ при амплитудно-фазовом управлении против 0.4 дБ при фазовом управлении. При фазовом управлении искажение ДН ФАР существеннее при калибровке по КА, находящейся в зоне Френеля ФАР, чем в дальней зоне ФАР.

Третья глава посвящена разработке алгоритма калибровки ФАР по секторам. Эта задача возникает при калибровке крупноапертурных ФАР в зоне Френеля, когда главный лепесток КА не охватывает всю апертуру ФАР. В таких случаях для калибровки необходимо разделить апертуру на пересекающиеся секторы, выполнить калибровку каналов каждого сектора, а затем свести полученные НКП каналов секторов в один массив. В работе предложено отказаться от известного способа, включающего калибровку секторов между собой, а вместо этого формировать секторы каналов с перекрытием, чтобы в двух независимых секторах были одни и те же каналы. В этом случае после калибровки секторов по отдельности можно отказаться от этапа калибровки секторов между собой и выполнить калибровку НКП секторов численно. Процедуру совмещения начальных коэффициентов передачи каналов разных секторов назовем «сшиванием».

Рассмотрим ФАР, апертура которой разделена на N пересекающихся секторов R_n (Рисунок 11а). Калибровка каналов ФАР в каждом секторе выполняется независимо с помощью соответствующей КА. В результате такой калибровки формируется N наборов комплексных НКП. В каждых двух соседних секторах R_{n-1} и R_n имеется пересечение Π_{n-1} , в котором расположены каналы, участвующие в двух независимых калибровках. Обозначим через \dot{G}_i^{0A} НКП, полученные при калибровке сектора R_{n-1} , а через \dot{G}_i^{0B} - НКП, полученные при калибровке сектора R_n . Для сшивания этих НКП предположим, что каналы, входящие в пересечение Π_{n-1} , освещены разными КА, расположенными в дальней зоне, но так, что амплитуды

возбуждения на всех входах одинаковы, т.е. $\dot{A}_{exi} \equiv 1$. Все управляемые коэффициенты передачи каналов приведем в начальное состояние, т.е. $\dot{G}_i \equiv 1$.

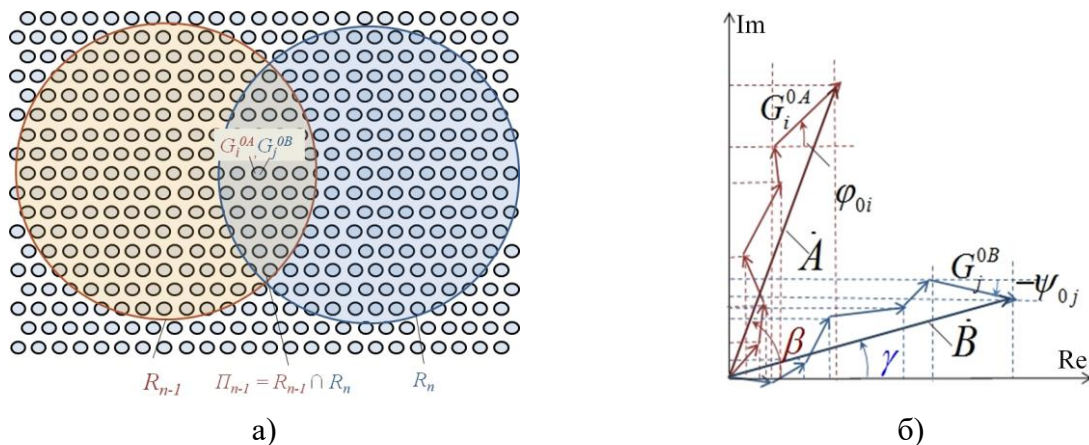


Рисунок 11 - Калибровка ФАР по секторам: (а) - пересекающиеся секторы ФАР для независимой калибровки; (б) – векторная диаграмма начальных коэффициентов передачи каналов, расположенных на пересечении двух соседних секторов

Как следует из (16), в этом случае сигнал на выходе каждого канала равен его НКП, и, соответственно, сумма сигналов от каналов в Π_{n-1} равна сумме их НКП. Суммарный сигнал на выходе каналов, входящих в Π_{n-1} , рассчитанный по результатам калибровки сектора R_{n-1} , в соответствии с (16), составляет: $\dot{A}_{n-1} = \sum_i \dot{G}_i^{0A}$.

А суммарный сигнал на выходе этих же каналов рассчитанный на основе калибровки каналов сектора R_n составляет: $\dot{B}_n = \sum_j \dot{G}_j^{0B}$, где i, j - номера каналов, входящих в Π_{n-1} .

Сшивание НКП каналов в секторах R_{n-1} и R_n выполним из условия равенства векторов \dot{A}_{n-1} и \dot{B}_n в области пересечения Π_{n-1} (Рисунок 11б). Для этого НКП \dot{G}_j^{0B} каналов n -го сектора, полученные на первом этапе калибровки, умножим на комплексное число $\dot{C}_n = C_n \cdot e^{i\chi}$, определяемое соотношением:

$$\dot{C}_n = \frac{\dot{A}_{n-1}}{\dot{B}_n}. \quad (36)$$

Если в каналах ФАР предусмотрено только управление фазами, то $|\dot{C}_n| = 1$, и с помощью (36) «сшиваются» только массивы фаз. Выбранный алгоритм удобен тем, что для него сравнительно просто вывести формулу для погрешности сшивания. Так например, сшивание секторов можно выполнить, применив численно (без измерений) метод МТЕ (Measurement of Two Elements) к каналам в перекрывающихся группах, но формула для расчета погрешности этого метода будет сложнее. Оценку погрешности сшивания фаз в зависимости от числа каналов, используемых при сшивании, и от количества процедур сшивания можно выполнить по формуле:

$$\Delta_{M,Q} = \Delta\varphi_0 \sqrt{\frac{2M}{Q}}, \quad (37)$$

где $\Delta\varphi_0$ – абсолютная погрешность определения начальной фазы; M – количество процедур сшивания; Q – количество каналов в пересечении секторов.

Разработанная методика калибровки каналов ФАР по секторам применена для определения НКП каналов крупноапертурной приемной 512-канальной ФАР S-диапазона. Апертура ФАР была разделена на четыре сектора. В каждом секторе выделены группы из 12 каналов (Рисунок 12) для сшивания НКП каналов в соседних секторах. Калибровочная антенна устанавливалась последовательно в четыре положения относительно апертуры в зоне Френеля ФАР. В каждом положении КА калибровался один сектор, включая группу каналов для сшивания. После калибровки каналов в секторах, путем сшивания сформирован единый массив НКП ФАР. Калибровка ФАР выполнена также для случая, когда вся апертура освещена КА, т.е. за один проход. Средняя погрешность сшивания для одного сектора, вычисленная как среднее арифметическое ошибок

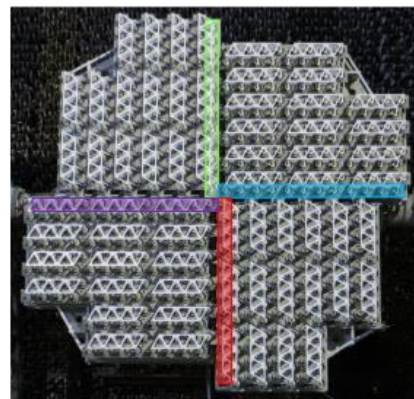


Рисунок 12 – Группы из 12 каналов для сшивания НКП

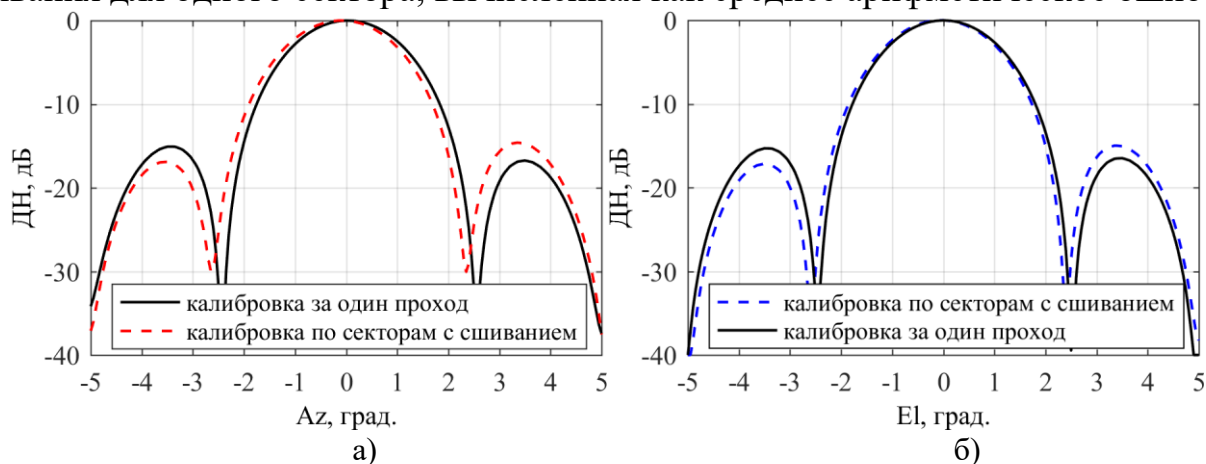


Рисунок 13 - Азимутальные (а) и угломестные (б) сечения ДН ФАР после калибровки каналов за один проход, и после калибровки по четырем секторам с последующим сшиванием НКП

сшивания секторов между собой по (37), составила 7.5° . На Рисунке 13 представлены измеренные ДН ФАР для случаев, когда калибровка ФАР выполнена по секторам, и когда калибровка выполнена за один проход. Различие КУ ФАР в этих случаях составило 0.07 дБ. Ошибка установки луча составила 3 угловых минуты, или менее 2% ширины луча. Различие УБЛ составило 2 дБ.

В конце третьей главы на основе вопросов раскрытых в работе, сформулирован общий подход для организации и проведения калибровки ФАР на открытых полигонах.

В **Заключении** представлены основные выводы и результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

1. Представлены основные методы калибровки ФАР. Проанализированы функциональные возможности и способы расчета погрешностей приведенных методов. А также подходы к организации калибровки ФАР на открытых полигонах.

2. Определено влияние геометрических погрешностей установки КА на фазовое распределение в апертуре и ДН ФАР после калибровки в зоне Френеля. Показано, что смещение КА вдоль апертуры приводит к ошибке установки луча, формируемого ФАР, на угол, равный отношению погрешности установки к расстоя-

нию между антеннами. Показано, что в этом случае в апертуре возникает кубическое, во втором приближении, искажение фазы. Показано, что при смещении калибровочной антенны в плоскости, перпендикулярной ФАР, в ее апертуре возникает квадратичное, во втором приближении, искажение фазы. Даны рекомендации по расположению КА относительно апертуры ФАР при калибровке в таких условиях.

3. Определено влияние рассеяния контрольного сигнала на результаты калибровки и ДН ФАР при различных положениях калибровочной антенны и источника рассеяния. Показано, что наибольшие искажения присутствуют когда КА и источник рассеяния расположены на одинаковом удалении от калибруемой ФАР. С приближением источника рассеяния к апертуре ФАР уровень искажений ДН уменьшается, однако зона искажений расширяется. С приближением КА уровень искажений растет, зона искажений сужается. Показано, что в случае калибровки только по фазе, амплитуды результирующих систематических погрешностей в два раза меньше чем амплитуда систематической погрешности при амплитудно-фазовом управлении.

4. Установлено влияние погрешности измерений мощности сигнала при калибровке коммутационным методом REV на результаты калибровки. Приведенные в диссертации результаты математического моделирования и эксперимента позволяют заключить, что предложенные соотношения могут быть использованы для прогнозной оценки фазовых и амплитудных погрешностей метода REV.

5. Разработан и обоснован алгоритм совмещения начальных коэффициентов передачи каналов между секторами ФАР после калибровки секторов по отдельности. Получены оценки погрешности совмещения НКП в зависимости от числа каналов в зонах перекрытия секторов и количества процедур сшивки. Показано, что для того, чтобы погрешность совмещения в последнем сшиваемом секторе ФАР не превышала погрешности калибровки, нужно задаваться числом каналов в области пересечения секторов в два раза бóльшим чем предполагаемое число процедур совмещения секторов. Разработанный алгоритм позволил исключить этап калибровки секторов между собой, то есть сократил временные затраты на калибровку.

В диссертации решена задача проведения калибровки ФАР на открытых полигонах за счет разработки алгоритмов прогнозной оценки результатов калибровки и алгоритма калибровки ФАР по секторам.

В **Приложении 1** представлен псевдокод алгоритма совмещения начальных коэффициентов передачи каналов после калибровки ФАР по секторам.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М. Оценка влияния близкорасположенного помехового сигнала при калибровке на результирующую ДН ФАР // Радиотехника. — 2012. — №4. — С. 96 – 101.
2. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М., Денисенко В.В. Влияние ошибки установки юстировочной антенны на фазовую ошибку в апертуре при формировании луча и калибровке в ближней зоне // Радиотехника. — 2013. — №5. — С. 89 – 94.

3. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М., Денисенко В.В. Методы калибровки фазированных антенных решеток // Радиотехника. — 2013. — №5. — С. 95 – 104.
4. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М. Оценка ошибок методов МТЕ и REV калибровки ФАР // Радиотехника. — 2014. — №1. — С. 72 – 78.
5. Верба Г.А., Коротецкий Е.В., Шитиков А.М. Особенности калибровки антенных решеток в условиях переотражения контрольного сигнала // Радиотехника. — 2021. — Т. 85. — № 4. — С. 34–44.
6. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М., Денисенко В.В. Калибровка фазированных антенных решеток на открытых полигонах // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». — 2022. — №4. — С. 30 – 41.

Публикации Scopus:

7. Yegor V. Korotetskiy, Alexander M. Shitikov, and Vladimir V. Denisenko Phased Array Antenna Calibration with Probe Positioning Errors // IEEE Antennas & Propagation Magazine. — Volume 58. — Issue 3. — P. 65 – 80.

Прочие публикации:

8. Шитиков А.М., Коротецкий Е.В. Исследование величины отклонения главного лепестка ДН плоской ФАР от осевого направления после проведения калибровочных процедур в ближней зоне в зависимости от ошибки определения координат юстировочной антенны // Тезисы докладов 10-й международной конференции «Авиация и Космонавтика» (Москва, 8 – 10 ноября 2011г.). — С. 199.
9. Korotetskiy Y.V., Shitikov A.M., Denisenko V.V. Phased array antenna calibration problems, including in-service and multi-element PAA calibration // Proceedings of the IX International Conference on Antenna Theory And Techniques, ICATT'13) (Одесса, 15 – 20 сентября 2013). — С. 405 – 407.
10. Yegor V. Korotetskiy, Vladimir V. Denisenko, Alexander M. Shitikov Features of calibration of large stationary phased array antennas // Proceedings of the International conference Engineering and Telecommunication, En&T-2021 (Москва, 24 – 25 ноября 2021).
11. Коротецкий Е.В. Вопросы калибровки ФАР в процессе эксплуатации // Тезисы докладов 20-й международной конференции «Авиация и Космонавтика» (Москва, 22 – 26 ноября 2021г.). — С. 313 – 314.