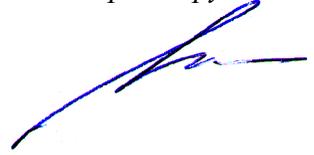


На правах рукописи



Манаенков Евгений Васильевич

**МАЛОГАБАРИТНЫЕ
ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ
КА-ДИАПАЗОНА**

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пономарёв Леонид Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Парнес Михаил Давидович
(главный конструктор, ООО «Резонанс»)

кандидат технических наук, с.н.с.
Инденбом Михаил Вульфович
(ведущий научный сотрудник,
АО «Всероссийский НИИ радиотехники»)

Ведущая организация: ПАО НПО «Стрела» (г. Тула)

Защита диссертации состоится « 20 » апреля 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться на сайте ma.i.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан « ___ » _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н.



А.А. Горбунова

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию особенностей построения высокоточных малогабаритных сканирующих в широком секторе углов фазированных антенных решеток (ФАР) мм-диапазона длин волн с пространственным возбуждением моноимпульсными облучателями.

Актуальность темы диссертации.

В последнее время появилась потребность в разработке ФАР мм-диапазона с электрическим сканированием луча для мобильных, оперативно разворачиваемых наземных систем вооружения. В составе таких систем присутствуют радиолокационные станции (РЛС) сопровождения целей, характеристики которых во многом определяются характеристиками их антенной системы (АС). Антенны таких систем, как правило, представляют собой две антенные решетки (АР) с существенно отличающимися размерами. ФАР с размерами раскрытия порядка нескольких сотен длин волн используется для сопровождения объекта на большом удалении от РЛС (более 1 км), а на малом удалении от РЛС применяется малоапертурная антенна с небольшим размером дальней зоны.

Точность пеленгации объекта вблизи РЛС определяется точностью сопровождения объекта малоразмерной ФАР. В то же время установлено, что для ФАР с малыми размерами выявлены существенные ограничения по точности установки луча при его сканировании в широком секторе углов. Поэтому проблема повышения точности пеленгования с использованием малогабаритных ФАР мм-диапазона и определения факторов, влияющих на эту точность, а также реально достижимых границ пеленгования является чрезвычайно актуальной задачей, определяющей достижимые (потенциальные) характеристики РЛС.

Для решения поставленной задачи требуется комплексный подход, учитывающий множество факторов, имеющих алгоритмическую, схемотехническую и электродинамическую природу возникновения.

К алгоритмическим факторам можно отнести ошибки, обусловленные выбором разрядности фазовращателей (ФВ) и алгоритмами вычисления фазового распределения.

К схемотехническим факторам относятся особенности реализации системы управления лучом (СУЛ) ФАР: нестабильность напряжений источников питания; неправильное формирование длительностей управляющих импульсов; падение напряжения на питающих проводниках и на ключе, формирующем управляющий импульс; влияние паразитных реактивностей.

Основными электродинамическими факторами, влияющими на точность пеленгования в рассматриваемых ФАР, являются: отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе каждого n -го излучателя ФАР; амплитудно-фазовые ошибки в требуемом амплитудно-фазовом распределении излучае-

мого (принимаемого) поля по раскрытию ФАР; в ФАР с круговой поляризацией поляризационные ошибки из-за отличия поляризационных диаграмм направленности (ДН) излучателей и ФАР в целом от поляризации принимаемого поля; взаимодействие излучателей в ФАР, приводящее к аномальной зависимости коэффициента усиления (КУ) ФАР в секторе сканирования; недостаточно хорошее согласование излучателей ФАР.

Все перечисленные факторы требуют тщательного изучения и анализа с целью минимизации ошибок установки луча ФАР и, как следствие, повышения точности пеленгования.

Вопросы создания проходных ФАР рассматривались рядом авторов: Р.С. Хансенем, Н. Амитеем, О.Г. Вендиком, М.Д. Парнесом, В.М. Крехтуновым, С.П. Скобелевым, А.В. Шишловым и др. Точность определения угловых координат с использованием различных методов пеленгования рассмотрена в работах А.И. Леонова и К.И. Фомичева, Я.С. Шифрина, Ю.Г. Сосулина, О.П. Черемисина, а также в работах Л.И. Пономарева и других работах. Однако до сих пор остаются неясными пределы достижения максимальной точности пеленгования при комплексном учете всех перечисленных выше факторов и вопросы формулировки требований к отдельным элементам и устройствам этих ФАР. Необходимость продолжения исследований в этом направлении обусловлена также развитием элементной базы и технологий и поиском новых технических решений при создании малогабаритных антенн РЛС сопровождения целей.

Объектом исследования является антенная система наземной РЛС сопровождения целей.

Предмет исследования – малогабаритная сканирующая ФАР мм-диапазона с пространственным возбуждением моноимпульсным облучателем.

Целью работы является анализ точности пеленгования с помощью малогабаритной ФАР Ка-диапазона волн и исследование возможности повышения точности пеленгования за счет минимизации влияния факторов, снижающих точность установки луча.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **основные задачи**:

- проведено сравнение потенциальной точности пеленгования с использованием цифровой N -канальной ФАР и четырехканальной ФАР такой же конфигурации и размеров с моноимпульсным суммарно-разностным методом пеленгования;
- выполнен анализ основных факторов, влияющих на реальную точность пеленгования в сканирующих ФАР проходного типа;
- предложены и обоснованы электродинамические модели и проведено полномасштабное моделирование характеристик как отдельного излучателя в составе ФАР, так и ФАР в целом;

- развита методика экспериментально-теоретического анализа детерминированных и случайных ошибок установки нуля разностных ДН в секторе сканирования ФАР;
- разработана методика экспериментально-теоретического анализа случайных ошибок интегрированных излучателей-фазовращателей (ИИФ) в секторе сканирования ФАР проходного типа;
- проведено комплексное исследование точности пеленгования в ФАР Кадиапазона в зависимости от ряда факторов, имеющих алгоритмическую, схемотехническую и электродинамическую природу возникновения, и установлено, что при оптимизации точности пеленгования основным препятствием для сужения границ ошибок являются ошибки ИИФ;
- показано, что при использовании современной технологии производства ИИФ и других элементов ФАР возможно достижение точности установки луча в разностной ДН порядка 0,02 от ширины суммарной ДН в секторе сканирования $\pm 45^\circ$.

Методы исследований основываются на использовании аппарата теории антенн и устройств СВЧ; численных электродинамических методов моделирования; численных методов оптимизации целевых функций; организации физического эксперимента и экспериментальной проверке основных теоретических результатов.

Научная новизна работы состоит в оценке предельной точности пеленгования с помощью ФАР проходного типа; разработке методики экспериментально-теоретического анализа случайных ошибок ИИФ в секторе сканирования ФАР проходного типа; развитии методики экспериментально-теоретического анализа детерминированных ошибок установки нуля разностных ДН в секторе сканирования ФАР; выводе теоретических соотношений, позволяющих учесть влияние различных факторов ухудшения точности установки луча на ошибки пеленгования; получении и анализе экспериментальных данных, позволяющих подтвердить эффективность предлагаемой методики оценки точности пеленгования.

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- 1) разработана схема и модель анализа характеристик направленности малоразмерных сканирующих ФАР проходного типа Ка-диапазона в коническом секторе углов с углом при вершине 45° с использованием ИИФ и четырехэлементного МИО с круговой поляризацией;
- 2) проведено комплексное исследование характеристик как отдельных элементов, так и ФАР в целом в секторе сканирования, а также в зависимости от отдельных узлов и элементов ФАР;
- 3) установлено теоретически и экспериментально, что при использовании ИИФ в такой схеме ФАР возможны провалы в ДН при гораздо меньших углах сканирования, чем это следует из размером ячейки ФАР, причем

эти углы разные для вертикальной и горизонтальной поляризаций и поэтому при сканировании на этих углах существенно меняется коэффициент эллиптичности ДН ФАР;

4) проведено исследование предельной и реальной точности пеленгования с использованием ФАР проходного типа и разработана методика теоретического и экспериментально-теоретического анализа детерминированных и случайных ошибок установки нуля в разностных ДН в диапазоне сектора сканирования, позволяющие существенно повысить точность пеленгования;

5) показано, что при использовании современной технологии производства ИИФ и введении соответствующих коррекционных алгоритмов пеленгования возможно достижение точности установки луча в разностной ДН порядка 0,02 от ширины суммарной ДН во всем секторе сканирования.

Практическая значимость результатов работы состоит в развитии теории методов расчета характеристик ФАР проходного типа в мм-диапазоне с целью достижения заданной точности пеленгования и обосновании эффективности применения разработанной методики повышения точности пеленгования, в том числе при реализации ФАР на современной элементной базе. Практическая ценность работы заключается в разработке и экспериментальном исследовании макетов высокоточных малоразмерных ФАР Ка-диапазона и ее отдельных узлов, а также подтверждается востребованностью результатов диссертации в ходе выполнения ряда ОКР.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование. Основные результаты реализованы в следующих работах и проектах: ОКР «РЛСН», ОКР «Панцирь-СМ» и ОКР «Панцирь-С1М».

Соответствующие акты внедрения прилагаются к диссертации.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений и преобразований при разработке физических и математических моделей исследуемых устройств; логичным физическим представлением результатов математического моделирования; хорошим совпадением результатов теоретического анализа с результатами экспериментальных измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предельная точность установки луча в моноимпульсных сканирующих ФАР определяется отношением сигнал/шум на выходе ФАР и при оптимизации амплитудной суммарно-разностной пеленгационной системы практически совпадает с предельной точностью в многоэлементных ФАР со спектрально-корреляционным методом цифровой обработки. Так, при ОСШ = 40 дБ предельная точность установки луча в ФАР с радиусом круглой апертуры $4,8\lambda$ составляет $2,3' \dots 2,8'$.

2. Основной вклад в ошибку установки луча в сканирующих ФАР проходного типа вносит детерминированная составляющая, уровень которой зависит от особенностей формирования разностных ДН моноимпульсного облучателя и краевых эффектов в решетке, и для разработанной ФАР с размером круглой апертуры 10λ составляет порядка 100'.

3. Установлено, что при современном уровне технологии и минимизации ошибок пеленгования, имеющих детерминированную природу, минимальное значение дисперсии случайных ошибок интегрированных излучателей-фазовращателей в секторе углов $\pm 45^\circ$ составляет примерно 8...10', что позволяет за счет использования корректировочных алгоритмов формирования фазового распределения в ФАР повысить точность пеленгования примерно на порядок (до 1/40...1/50 ширины ДН по суммарному каналу) во всем секторе сканирования.

4. Детерминированная составляющая и дисперсия случайных ошибок интегрированных излучателей-фазовращателей в сканирующих ФАР могут быть определены экспериментально с помощью разработанной методики измерения и последующего теоретического анализа ошибок установки луча при изменении одинаковых фазовых «подставок» всех фазовращателей ФАР, задаваемых системой управления лучом.

5. При повышенных требованиях к точности пеленгования необходим тщательный учет и минимизация влияния полной совокупности перечисленных в работе факторов (оптимизации алгоритма управления, схемотехническая реализация и электродинамических факторов). При этом наибольшую сложность в повышении точности пеленгования представляет технология изготовления отдельных элементов в излучающем раскрыве ФАР и получения стабильных линейных характеристик интегрированных излучателей-фазовращателей.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы нашли отражение в практических разработках соответствующих малогабаритных ФАР Ka-диапазона и докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2020, Воронеж), а также X Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы наземной радиолокации» (2013, Тула).

Личный вклад.

Основные результаты диссертации получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. В частности, в работах, опубликованных в соавторстве, автором лично предложена постановка задачи. Также он принимал активное участие в разработке алгоритмов моделей, в разработке макетов, узлов и ФАР в целом, проведении экспериментальных исследований и сопоставлении их с результатами теоретического анализа.

Публикации.

По основным результатам исследований, выполненных в диссертации, опубликовано 7 печатных работ, из них 4 научные статьи и 3 тезиса докладов в сборниках трудов конференций, получено 42 патента РФ на полезные модели и изобретения как отдельных узлов, так и ФАР в целом, в том числе 14 патентов, подтвержденных актами о внедрении.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 175 машинописных страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 78 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников включает 86 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность разработки малогабаритных сканирующих ФАР мм-диапазона, сформулированы цели и задачи исследований, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

Отмечено, что при разработке и исследовании ФАР с малыми размерами раскрывов, не превышающими нескольких десятков длин волн, выявлены существенные ограничения по точности установки луча при его сканировании в широком угловом секторе. Это приводит к увеличению ошибок пеленгования при использовании таких ФАР в составе малогабаритных моноимпульсных РЛС сопровождения целей.

В первой главе проведен анализ результатов, достигнутых в области разработки ФАР моноимпульсных РЛС сопровождения целей, определены возможные схемы построения таких антенн и сформулированы требования, предъявляемые к характеристикам ФАР рассматриваемого диапазона длин волн: частотный диапазон – Ка; полоса частот – 800...1000 МГц; габаритные размеры раскрыва – порядка 10λ ; сектор сканирования – конический, с углом при вершине 45° ; поляризация излучаемого поля – круговая; уровень боковых лепестков – не выше -20 дБ; точность установки луча – не хуже $15'$.

Среди известных схем возбуждения многоэлементных малогабаритных АР предпочтение отдается системам с оптическим распределением мощности в силу простоты их реализации по сравнению, например, с волноводными схемами возбуждения АР, а также дешевизны и удобства при реализации моноимпульсных систем. При создании ФАР с оптическим распределением мощности возможно использование как проходной, так и отражательной схем.

Применение проходной ФАР дает возможность независимо оптимизировать излучатели приемной и апертурной части АР, выполняющих разные функции. Еще одно преимущество ФАР проходного типа с оптическим

распределением мощности в Ка-диапазоне – возможность ее построения с применением элементов в виде ИИФ. Такие элементы с ФВ, работа которых основана на использовании эффекта Фарадея, имеют простую конструкцию, высокую серийнопригодность и малые поперечные размеры, что, в свою очередь, позволяет размещать их в раскрыве ФАР с малым шагом и увеличить сектор сканирования ФАР. С учетом вышесказанного выбор сделан в пользу ФАР, построенных по проходной схеме.

Типичная схема построения проходной ФАР с пространственным распределением мощности включает в себя полотно из интегрированных элементов, каждый из которых состоит из приемного диэлектрического излучателя, волноводного ферритового ФВ и апертурного диэлектрического излучателя. АР приемных излучателей возбуждается МИО, излучающим электромагнитную волну с круговой поляризацией поля со сферическим фазовым фронтом.

Рассматриваемые ФАР работают в приемном и передающем режимах. Более удобно рассматривать их характеристики в режиме передачи. В передающем режиме сигнал от передатчика со средней частотой f_0 поступает на суммарный вход МИО, состоящего из отдельных излучателей в виде открытых концов квадратных волноводов. С помощью поляризаторов, расположенных в канале каждого излучателя, в апертуре каждого излучателя формируется поле излучения круговой поляризации. Это поле круговой поляризации принимается излучателями антенного полотна, фазуется с помощью ферритовых ФВ и переизлучается в окружающее пространство по закону ДН ФАР $F_{\text{ФАР}}(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0)$, где θ_0, φ_0 – направление максимума ДН. Реализация требуемого фазового распределения для получения заданного отклонения луча θ_0, φ_0 производится ФВ, управление которыми осуществляется СУЛ.

В общем случае МИО в режиме передачи обеспечивает формирование суммарной ДН (вход $\Sigma_{\text{прд}}$), а в режиме приема – суммарной и двух разностных ДН (выходы $\Sigma_{\text{прм}}, \Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}}$), и представляет собой АР из $N_{\text{обл}}$ волноводных излучателей. Для получения круговой поляризации излучения в раскрыве облучателя на его выходе установлены селекторы круговых поляризаций, которые могут быть реализованы различными способами (например, в виде поляризатора с перегородкой, называемого septum-поляризатором, или селектора линейных поляризаций с установленным на его выходе преобразователем поляризации). В любом случае это позволяет получить на выходе две волны H_{10} и H_{01} с требуемым фазовым сдвигом в 90° между составляющими поля H_{10} и H_{01} . Расстояние между фазовыми центрами волноводов выбирается с учетом требуемого продольного размера ФАР и амплитудного распределения поля в раскрыве АР с требуемыми уровнями полей на краях, обеспечивающих заданную величину УБЛ.

Кроме того, в первой главе представлены результаты анализа факторов, влияющих на характеристики малогабаритных ФАР мм-диапазона длин волн с пространственным распределением мощности. Показано, что факторы, влияющие на точность установки луча ФАР, условно можно разделить на три категории: 1) факторы, природа происхождения которых связана с алгоритмами управления элементами ФАР; 2) факторы, обусловленные особенностями схемотехнической реализации СУЛ ФАР; 3) факторы, имеющие электродинамическую природу.

Подробный анализ перечисленных факторов показал, что ошибки пеленгования из-за причин, обусловленных алгоритмическими ошибками и особенностями схемотехнической реализации, при правильном конструировании и оптимизации алгоритмов управления ФВ могут быть минимизированы и оказывают гораздо меньшее влияние по сравнению с ошибками, имеющими электродинамическую природу. Поэтому остальная часть работы связана с анализом влияния именно электродинамических факторов на точность установки луча ФАР.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию алгоритма моделирования характеристик направленности ФАР проходного типа, которые определяются как характеристиками облучателя, так и характеристиками излучающего полотна, в частности, параметрами отдельных ИИФ.

В работе получены основные соотношения для моделирования характеристик направленности ФАР проходного типа, геометрия которой в выбранной системе координат изображена на рис. 1.

Алгоритм моделирования ФАР сводится к расчету ДН многоэлементного (в представленном случае четырехэлементного) облучателя с полем возбуждения (в режиме передачи), обеспечивающим круговую поляризацию правого направления вращения на теневой поверхности ФАР, и последую-

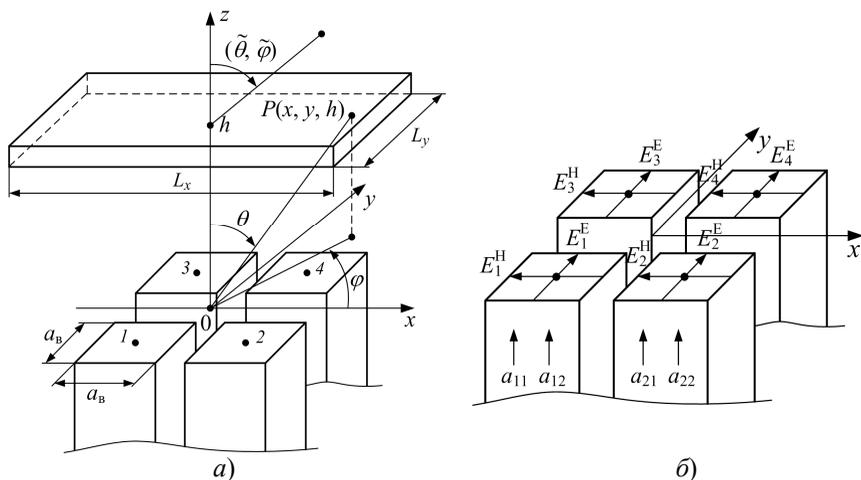


Рис. 1. Геометрия исследуемой антенны в выбранной системе координат

щему преобразованию этого поля с помощью ФВ на освещенную поверхность ФАР с дальнейшим анализом поля излучения ФАР по основной и паразитной поляризациям.

Так как рассматриваемая антенна работает в приемном режиме, то также был разработан алгоритм определения приемного поля, отражаемого целью, с использованием матрицы отражения от цели. Используя эту матрицу, можно определить поле и ДН ФАР по основной и паразитной поляризациям. ДН m -го излучателя рассчитывалась как с учетом взаимодействия излучателей, так и в предположении, что ДН одинаковы во всех излучателях. Отличия в ДН отдельных излучателей (по основной поляризации) с учетом взаимодействия в конечных ФАР представлены на рис. 2.

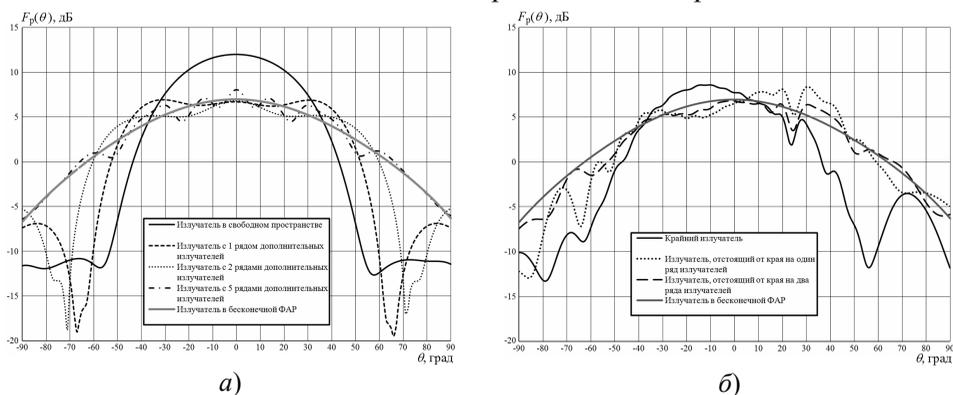
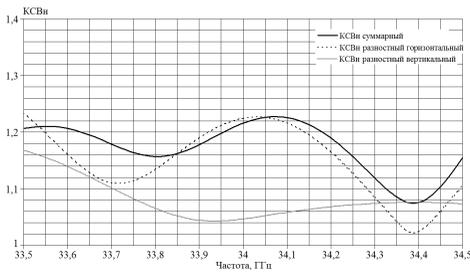


Рис. 2. ДН излучателя: *a* – в свободном пространстве и в составе АР; *б* – окруженного в разных направлениях различным числом рядов пассивных излучателей

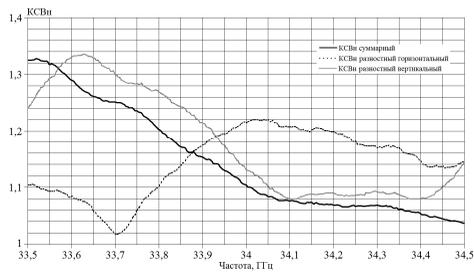
Как видно, ДН излучателя, расположенного на краю апертуры, существенно отличается от ДН излучателя, расположенного в центре ФАР. Однако при установлении основных ошибок в секторе сканирования в первом приближении возможно использование формы ДН как в бесконечной ФАР.

Далее представлены результаты разработки и моделирования характеристик направленности оптимизированного по рабочей полосе частот облучателя в виде АР из четырех квадратных волноводов с круговой поляризацией. На рис. 3 и 4 приведены графики характеристик облучателя, полученные в результате электродинамического моделирования описанной выше конструкции облучателя и в результате измерения макета МИО.

Характеристики согласования представлены на рис. 3. Видно, что по всем входам КСВ на рабочей частоте не хуже значения 1,35 в рабочей полосе частот, что говорит о хорошем согласовании системы. Полученные в результате моделирования суммарная и разностные ДН МИО в двух ортогональных плоскостях представлены на рис. 4. Как следует из приведенных графиков, смоделированный облучатель обеспечивает заданный уровень облучения на полотне ФАР в секторе облучения. При этом уровень паразитной поляризации составляет не более -20 дБ.



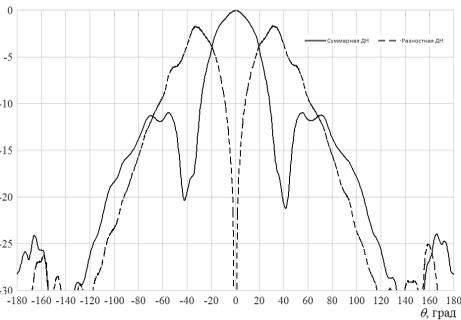
а)



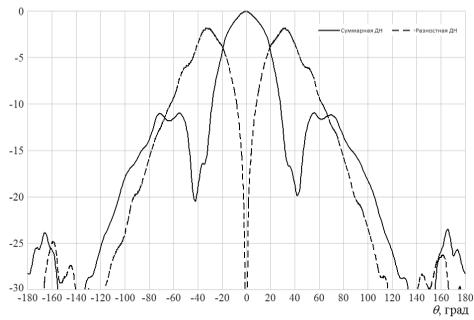
б)

Рис. 3. Графики частотной зависимости КСВ по трем входам:

а – расчетные; б – измеренные



а)



б)

Рис. 4. ДН (в масштабе КНД) МИО по основной составляющей круговой поляризации:

а – в вертикальной плоскости ($\varphi = 90^\circ$); б – в горизонтальной плоскости ($\varphi = 0^\circ$)

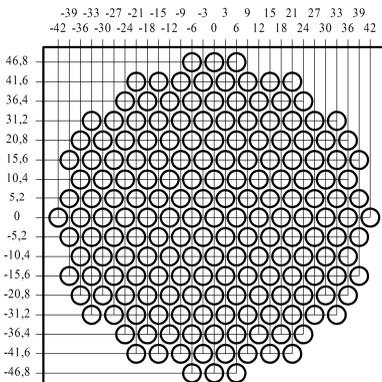


Рис. 5. Геометрия полотна ФАР

Геометрия полотна ФАР показана на рис. 5. Полотно ФАР состоит из 17 линеек. Число элементов в каждой линейке (при нумерации линеек сверху вниз) соответственно равно: 3; 8; 9; 12; 13; 14; 13; 14; 15; 14; 13; 14; 13; 12; 9; 8; 3. Общее число элементов АР составляет 187. Расстояние между фазовым центром облучателя и полотна ФАР $h = 79$ мм ($h/\lambda_0 \approx 9$). Радиус полотна ФАР $R_{\text{ФАР}} = 42$ мм.

ДН ФАР при заданном амплитудном распределении в двух ортогональных плоскостях для случаев формирования луча по нормали к раскрытию ФАР приведены на рис. 6. При этом в качестве ДН одного излучателя выбирались ДН вида $\sqrt{\cos(\theta)}$ (сплошная линия) и $\cos(\theta)$ (пунктирная линия). Здесь представлены ДН ФАР без учета взаимодействия излучателей.

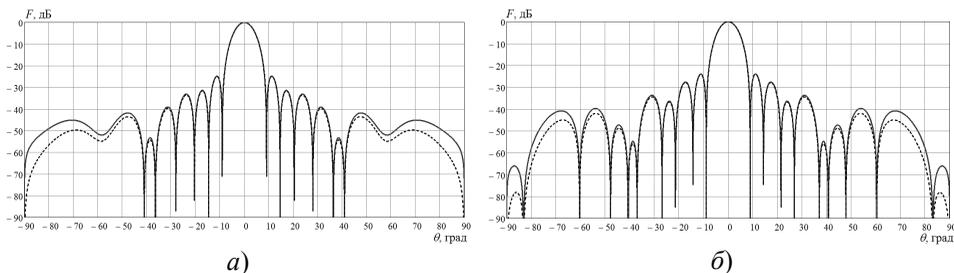


Рис. 6. ДН ФАР по суммарному каналу: *а* – в вертикальной плоскости ($\varphi = 90^\circ$) для неотклоненного луча $\theta_0 = 0^\circ$; *б* – в горизонтальной плоскости ($\varphi = 0^\circ$) для неотклоненного луча $\theta_0 = 0^\circ$

В таблице представлена оценка потерь КУ ФАР в суммарном канале при формировании луча ДН по нормали к апертуре.

В ФАР Ка-диапазона в качестве отдельных излучателей и ФВ используются ИИФ. Поперечные размеры такого излучателя при гексагональной сетке их размещения в полотне ФАР (рис. 5) позволяют в рамках приближенной теории обеспечить однолучевое сканирование в коническом секторе с углом при вершине конуса 45° .

Таблица. Оценка потерь КУ ФАР в суммарном канале

Составляющая потерь КУ	Величина потерь, дБ
Перелив энергии облучателя за края раскрыва ФАР	1,5
Потери в фазовращателях и элементах ФАР на поглощение и отражение	1,8
Потери на дискретность фазирования	Менее 0,014 дБ
Потери на кроссполяризацию	0,32
Потери МИО	0,6
Потери обтекателя	0,1...0,3
Суммарные потери	4,3...4,5

Процессы, происходящие в подобном элементе, являются более сложными, чем просто внесение требуемого фазового сдвига, что может приводить к сужению сектора сканирования и появлению аномальных провалов в ДН ФАР. Для определения зависимости КУ в секторе сканирования в АР из таких излучателей рассматривалась модель излучателя в виде диэлектрического стержневого излучателя (без ФВ).

На рис. 7 приведены зависимости коэффициента передачи S_{12} и ДН отдельного элемента в плоскости $\varphi = 0^\circ$ (горизонтальная поляризация) и в плоскости $\varphi = 90^\circ$ (вертикальная поляризация). Как видно, на кривых имеются провалы из-за резонансных эффектов в излучателе.

При моделировании элемента ФАР был обнаружен эффект снижения КУ на некоторых углах сканирования, отличающихся от «классических» углов. Условно можно выделить три причины появления провалов в ДН:

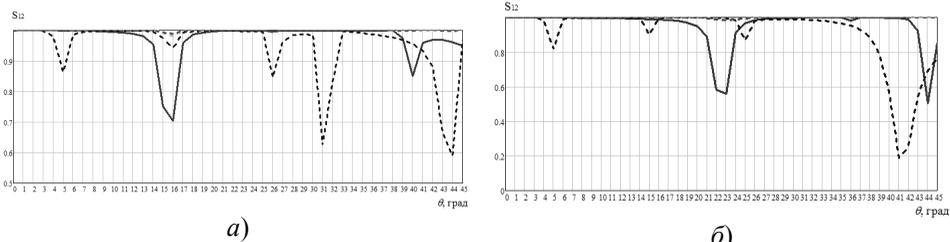


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента передачи S_{12} от угла θ :
 а – в плоскости $\varphi = 0^\circ$; б – в плоскости $\varphi = 90^\circ$

- плохое согласование приемных и передающих конусов;
- резонансные эффекты внутри диэлектрического стержня;
- падения, связанные с интерференционными побочными максимумами.

Качество согласования в ИИФ зависит от сектора обзора ФАР и от технологии производства таких излучателей. Поэтому в дальнейшем для обеспечения хороших характеристик ФАР требуется проведение дополнительных исследований по устранению (минимизации) отмеченных выше эффектов.

Падение КУ на некоторых углах сканирования АР напрямую влияет на ОСШ, что также приводит к снижению точности пеленгования, поэтому важным условием при разработке интегрированного элемента проходной ФАР является минимизация количества таких провалов путем согласования приёмного и передающего конусов и подбор длины элемента с учётом удовлетворения приведенным требованиям.

В третьей главе проводится подробный анализ точности пеленгования с помощью ФАР рассматриваемого типа с учетом их характеристик направленности, оцененных в предыдущей главе. На начальном этапе сравнивалась потенциальная точность пеленгования с использованием цифровой ФАР с точностью пеленгования ФАР с моноимпульсным суммарно-разностным методом пеленгования. На основе неравенства Крамера–Рао было показано, что для антенны в виде круглого раскрыва с электрическим радиусом ka СКО пеленгования σ_θ с использованием цифрового метода имеет вид

$$\sigma_{\theta \text{ кр}} \approx \frac{114,6}{ka\sqrt{q^{\text{ВЫХ}}}} \text{ [град]}, \quad (1)$$

а при пеленговании в моноимпульсных суммарно-разностных системах

$$\tilde{\sigma}_{\theta \text{ кр}} \approx \frac{113,7}{ka\sqrt{q^{\text{ВЫХ}}}} \text{ [град]}, \quad (2)$$

где $q^{\text{ВЫХ}}$ – ОСШ на выходе ФАР, определяемое как $q^{\text{ВЫХ}} = q_1^{\text{ВЫХ}} N$.

Сравнение выражений (1) и (2) показывает, что для однолучевого сигнала точность пеленгования при оптимизации амплитудной суммарно-разностной пеленгационной системы практически совпадает с максимально возможной точностью цифрового пеленгования.

На рис. 8 представлены рассчитанные по (1) и (2) зависимости для круглого раскрыва от ОСШ на выходе ФАР, которые показывают что для получения ошибки в 1–2 угл. мин величина ОСШ должна быть не менее 50 дБ.

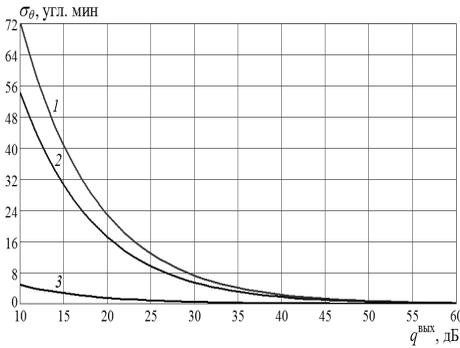


Рис. 8. Графики зависимости СКО оценки угловой координаты θ от ОСШ на выходе ФАР с различными размерами круглой апертуры: 1 – $ka = 30$; 2 – $ka = 40$; 3 – $ka = 450$

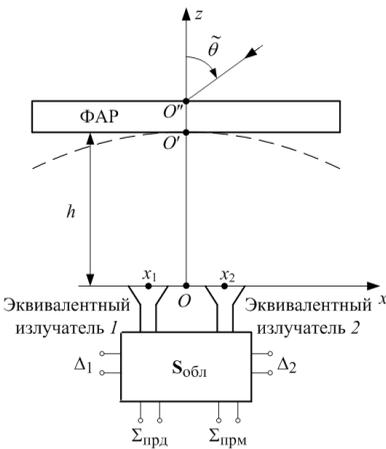


Рис. 9. Упрощенная схема ФАР

менения формы ДН. Поэтому $F_{\Sigma 1}(\theta) = F_{\Sigma}(\theta - \theta_0)$, $F_{\Sigma 2}(\theta) = F_{\Sigma}(\theta + \theta_0)$. При этом углы смещения $\pm\theta_0$ при $\Delta x \leq \lambda/2 \dots \lambda$ определяются из соотношения $\sin \theta_0 \approx \theta_0 = \pm \Delta x/h$, где $h = OO'$ – фокусное расстояние.

При идеальном фазировании относительно равносигнального направления $\tilde{\theta}_0$ и при падении плоской волны с направления $\tilde{\theta}_0$ поля, принятые эквивалентными излучателями 1 и 2, равны. При смещении направления падения волны на угол $\Delta\theta$ относительно равносигнального направления поля сигналов, принятых эквивалентными излучателями 1 и 2, не равны, и на

На следующем этапе проводился анализ реальной моноимпульсной ФАР в режиме приема. В предположении, что на верхнюю апертуру ФАР падает плоская волна с направления $(\tilde{\theta}, \tilde{\varphi} = 0)$ и с поляризацией, согласованной с поляризацией излучателей ФАР, при идеальном фазировании на нижней поверхности ФАР образуется поле, обеспечивающее фокусирование переизлучаемого нижней поверхностью ФАР поля в точку O (рис. 9). На суммарном и разностном приемных выходах многополосника $S_{обл}$ формируются суммарная и разностная ДН.

Обозначим через $F_{\Sigma}(\theta)$ нормированную ДН по полю облучателя из двух эквивалентных излучателей, расположенного в фокальной точке O , а через $F_{\Sigma 1}(\theta)$ и $F_{\Sigma 2}(\theta)$ – аналогичные ДН эквивалентных излучателей, находящихся в точках 1 и 2, смещенных относительно точки O на $\Delta x_1 = -\Delta x_2$. Смещение эквивалентных излучателей приводит к отклонению максимумов ДН $F_{\Sigma 1}(\theta)$ и $F_{\Sigma 2}(\theta)$ на углы $\pm\theta_0$ относительно равносигнального направления $\tilde{\theta}_0$ без существенного из-

разностном выходе Δ_1 возникает сигнал ошибки $E_{\Delta_1}(\theta)$, который с точностью до некоторой константы c определяется соотношением

$$E_{\Delta_1}(\theta) = c[A_1 F_{\Sigma 1}(\theta) - A_2 F_{\Sigma 2}(\theta)], \quad (3)$$

где A_1, A_2 – комплексные коэффициенты, зависящие от элементов матрицы облучателя $S_{\text{обл}}$, ДН отдельных излучателей, краевых эффектов, взаимодействия излучателей и прочих факторов и определяющие возможную погрешность вычитания полей облучателя в разностном канале.

Раскладывая $F_{\Sigma 1}(\theta)$ и $F_{\Sigma 2}(\theta)$ в ряды Тейлора в окрестности точек $\theta = \tilde{\theta}_0 + \theta_0$ и $\theta = \tilde{\theta}_0 - \theta_0$ и подставляя их в (3), записываем уравнение $E_{\Delta_1}(\theta_{\text{мин}}) = 0$, решая которое относительно $\Delta\theta$, получаем выражение для круглой апертуры с равномерным амплитудным распределением

$$\Delta\theta_{\text{кр}} = -9695 \frac{1 - A_2/A_1}{1 + A_2/A_1} \frac{1}{ka \cos \tilde{\theta}_0} [\text{угл. мин}],$$

а для круглой ФАР со спадающим к краям амплитудным распределением по раскрытию находим

$$\Delta\theta_{\text{кр}}(\Delta, n) = \gamma(\Delta, n) \frac{2020}{ka \cos \tilde{\theta}_0} \frac{1 - \frac{A_2}{A_1}}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \left[1 - \frac{5,8 \left[(1 - \Delta) + \frac{\Delta}{n+1} \right]}{\left[(1 - \Delta) + \frac{\Delta}{n+1} \frac{2}{n+2} \right] \gamma^2(\Delta, n)} \right] [\text{угл. мин}],$$

где Δ, n – параметры амплитудного распределения; $\gamma(\Delta, n)$ – коэффициент расширения луча ДН.

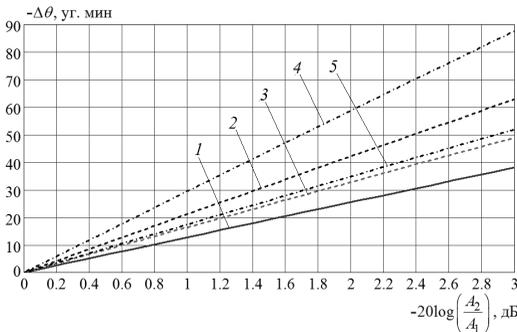


Рис. 10. Графики зависимости отклонения $\Delta\theta$ от A_2/A_1 для ФАР с круглой апертурой размера $ka = 30$ при различных амплитудных распределениях по раскрытию: 1 – $\Delta = 0, n = 0$; 2 – $\Delta = 1, n = 1$; 3 – $\Delta = 0,7, n = 1$; 4 – $\Delta = 1, n = 2$; 5 – $\Delta = 0,7, n = 2$

Графики на рис. 10 показывают, что в зависимости от A_2/A_1 наблюдается значительное детерминированное смещение угла пеленгования при угловом секторе сканирования $\pm 45^\circ$.

Полученные в данной главе результаты позволяют определить максимально допустимую детерминированную ошибку пеленгования из-за неточности суммирования полей в матрице облучателя. Кроме того, выведенные соотношения можно использовать для формирования требований к допустимым

случайным ошибкам фазирования, обеспечивающим заданную погрешность пеленгования при известных размерах антенны.

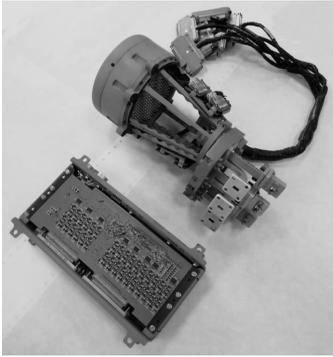


Рис. 11. Фото макета малогабаритной проходной ФАР Ка-диапазона

Четвертая глава посвящена анализу результатов экспериментального исследования макета проходной ФАР (рис. 11) с целью выявления причин снижения точности установки луча: исследование влияния фазовой подставки на точность пеленгования; экспериментальное определение СКО детерминированных ошибок; экспериментальное и теоретическое определение детерминированных ошибок в секторе сканирования; определение границ ошибок; сравнительный анализ результатов

экспериментальных измерений и теоретических оценок.

На рис. 12 приводятся результаты измерения суммарных и разностных ДН макета ФАР в азимутальной ($\varphi = 0^\circ$) плоскости для двух случаев отклонения луча ФАР: 1) луч формируется по нормали к раскрытию излучающего полотна $\theta_0 = 0^\circ$; 2) луч отклоняется в азимутальной плоскости на $\theta_0 = 45^\circ$.

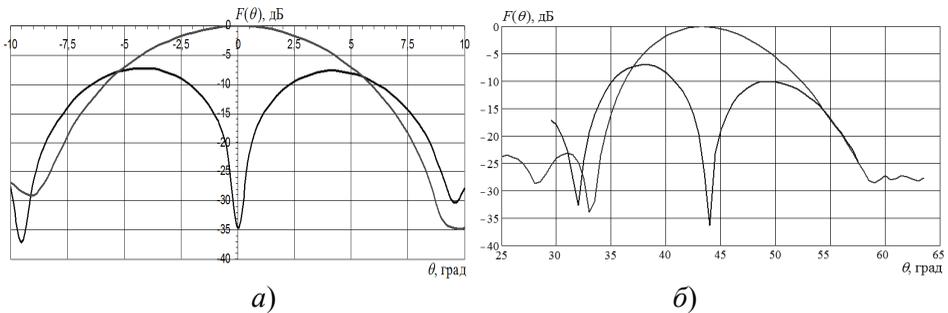


Рис. 12. Нормированные экспериментальные суммарная и разностная ДН ФАР в азимутальной плоскости: *a* – $\theta_0 = 0^\circ$; *б* – $\theta_0 = 45^\circ$

Измеренные ДН ФАР могут быть использованы для определения обобщенных ДН ИИФ, по которым можно судить о качестве изготовления используемых элементов. На рис. 13 представлена ДН интегрированного элемента полотна ФАР (сплошная линия) и ее аппроксимация с помощью функции косинуса, возведенной в степень $n = 0,82$ (пунктирная линия). Величина степени определялась по минимуму суммы квадратов разности значений построенной ДН и функции $(\cos \theta)^n$ для ряда значений углов сканирования. На этом рисунке также показан график зависимости $(\cos \theta)^{0,5}$ для идеализированного излучателя в составе решетки (штрихпунктирная линия).

Как следует из рис. 12, в измеренной ДН наблюдаются резкие провалы в направлениях, гораздо меньших, чем направления возникновения интерференционных максимумов ДН АР (см. рис. 7). Эти провалы, скорее все-

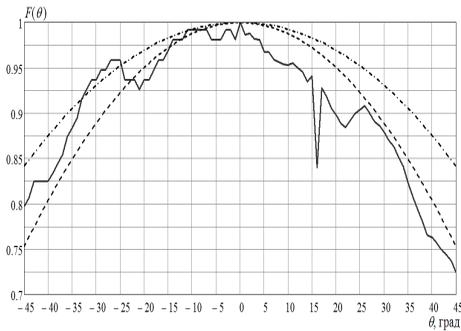


Рис. 13. Нормированная ДН интегрированного элемента

углы отклонения максимума суммарной ДН и минимумов разностных ДН отличаются от требуемых на величину, достигающую $100' \dots 120'$.

Одним из вариантов повышения точности установки луча является коррекция фазового распределения по раскрыву АР (для устранения квазидетерминированных составляющих ошибок), для чего нужно проводить дополнительные исследования причин отличия фактического фазового распределения по раскрыву АР от требуемого. Для этого в данной главе также исследованы краевые эффекты, так как известно, что их наличие в АР конечного размера может приводить к отклонению главного лепестка суммарной ДН и минимума разностной ДН от задаваемого направления сканирования. Рассмотрено влияние этих эффектов на примере двух линейных АР: щелевой АР и АР из диэлектрических стержневых излучателей, оканчивающихся усеченными конусами. Из полученных результатов следует, что величина краевого эффекта зависит от типа используемых излучателей. Установлено, что для АР из диэлектрических стержневых излучателей зависимость ошибки установки луча от величины угла отклонения луча имеет экстремальный характер, что осложняет учет влияния краевых эффектов в случае разработки ФАР из таких излучателей.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что зависимость точности установки луча в секторе ФАР имеет детерминированную и случайную составляющие, причем значения каждой составляющей зависят от направления фазирования θ_0 .

Детерминированные ошибки, обязанные различию максимумов разностных ДН и ошибкам краевых эффектов, имеют схожую физическую природу. Поэтому суммарная детерминированная ошибка установки минимума разностной ДН $\Delta\theta_d$ определяется суммой этих ошибок:

$$\Delta\theta_d = \Delta\theta_{0\text{кр}} + \Delta\theta_{0\text{кр.эф}} \quad (4)$$

где $\Delta\theta_{0\text{кр}}$ — ошибка из-за различия максимумов разностных ДН для ФАР в виде круглой апертуры с соответствующим амплитудным распределением; $\Delta\theta_{0\text{кр.эф}}$ — ошибка из-за краевых эффектов.

го, связаны как с эффектами взаимодействия соседних излучателей, так и с возможными резонансными эффектами внутри ИИФ, физическая природа которых рассмотрена в разделе 2.4.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что при классическом управлении фазовым распределением по элементам полотна ФАР при формировании луча в направлении на границу сектора сканирования $\pm 45^\circ$ фактические

Полная ошибка пеленгования $\Delta\theta_{\Sigma}$ состоит из детерминированной $\Delta\theta_{\text{д}}$ и случайной $\Delta\theta_{\text{сл}}$ ошибок:

$$\Delta\theta_{\Sigma} = \Delta\theta_{\text{д}} + \Delta\theta_{\text{сл}}. \quad (5)$$

Если первая ошибка в (5) имеет физическую природу и достаточно устойчива по отношению к технологии производства, то случайная составляющая в (5) определяется уровнем технологии производства отдельных узлов и элементов ФАР (в первую очередь технологией изготовления ИИФ), а также их сборкой.

Детерминированная составляющая может быть аппроксимирована (в простейшем случае линейной функцией) из условия минимизации величины $\sum_j [\Delta\theta_{\text{ф}}(\theta_j) - \Delta\theta_{\text{д}}(\theta_j)]^2$, где $\Delta\theta_{\text{ф}}(\theta_j)$ – фактическая ошибка установки луча при угле сканирования θ_j ; $\Delta\theta_{\text{д}} = \alpha\theta_0$.

Дисперсия случайной составляющей $\sigma_{\text{сл}}$ может быть определена экспериментально с помощью усреднения $\Delta\theta_{\Sigma}$ по всем фазовым подстановкам $\delta_i = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$ для каждого значения угла фазирования θ_0 :

$$\sigma_{\text{сл}}^2 = \sum_i \Delta\theta_{\text{ср}i}^2, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{\text{ср}i}$ – среднее значение ошибки установки луча при i -й фазовой подставке δ_i .

Операцию выделения детерминированной составляющей $\Delta\theta_{\text{д}}$ и дисперсии ошибок пеленгования $\sigma_{\text{сл}}$ целесообразно проводить на каждой средней частоте ω_k k -го поддиапазона частот, на которые разбивается весь рабочий диапазон ФАР.

На рис. 14 представлены экспериментально-теоретические зависимости детерминированных ошибок в азимутальном секторе сканирования из-за разности максимумов разностной ДН. Здесь обозначено: кривая 1 – зависимость, рассчитанная по соотношению для $\Delta\theta_{\text{кр}}(\Delta, n)$, в котором использованы значения A_1, A_2 , полученные из экспериментальных исследований; кривая 2 – теоретическая суммарная зависимость $\Delta\theta_{\text{д}}$ с учетом краевых эффектов, рассчитанная по соотношению (4); кривая 3 – экспериментально измеренная зависимость (соотношение (5)) от угла фазирования θ_0 .

Как видно из этого рисунка, во-первых, кривые $\Delta\theta_{\text{д}}$ существенно зависят от угла фазирования θ_0 в секторе $0 \dots 45^\circ$ и близки к линейной зависимости (кривая 5 на рис. 14); во-вторых, экспериментальная $\Delta\theta_{\text{д эксп}}$ (кривая 3) и теоретическая $\Delta\theta_{\text{д теор}}$ (кривая 2) зависимости детерминированной составляющей достаточно хорошо совпадают друг с другом. Кроме того, случайные отклонения расчетной и экспериментальной кривых 2 и 3 в значительной части сектора сканирования лежат примерно в интервале $\pm\sigma$ (прямые сплошные линии 4 на рис. 14, б), которая в соответствии с проведенными

расчетами в худшем случае составляет $8,5'$, и лишь в секторе углов, близких к 45° , границы интервала ошибок возрастают.

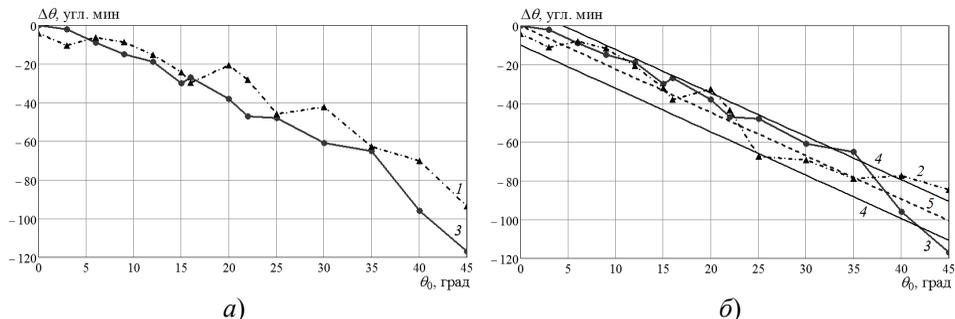


Рис. 14. Графики зависимости ошибки установки луча в рабочем секторе углов сканирования: *а* – исходные данные; *б* – обработанные данные

Процедура определения коэффициента α в соотношении для $\Delta\theta_{\text{д}}$ и дисперсии σ изложена в разделе 4.4 диссертации. Суть этой процедуры заключается в том, что для каждого угла фазирования θ_0 меняется начальное фазовое распределение по апертуре при сохранении общего закона распределения между излучателями. Начальное фазовое распределение меняется в секторе значений начальных фаз $[0^\circ, 330^\circ]$ с шагом $\delta = 30^\circ$. При этом измерение характеристик ФАР проводится для каждого значения начальной фазы δ_n ($\delta_n = \delta \cdot n$, $n = 0, 1, \dots, 11$) и каждого угла фазирования θ_0 .

Полученные данные по влиянию начальной фазы в каждом ФВ на суммарные и разностные ДН ФАР могут быть использованы для оценки случайных компонентов суммарной ошибки пеленгования:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta\theta_{\text{теор}n} - \Delta\theta_{\text{ср теор}})^2},$$

где N – число точек измерения (число исследуемых фазовых подставок); $\Delta\theta_{\text{теор}n}$ – значение отклонения минимума разностной ДН, рассчитанное по теоретической формуле на основе экспериментальных данных о разности максимумов разностной ДН при n -м значении фазовой подставки; $\Delta\theta_{\text{ср теор}}$ – среднее значение отклонения минимума разностной ДН.

В предположении, что наибольшее значение величин СКО $\sigma_{\text{теор}}$ обязано вкладу дисперсии ФВ $\sigma_{\Delta\theta\text{ФВ}}^2$, дисперсии ошибок из-за шумов $\sigma_{\Delta\theta\text{ОСШ}}^2$ и дисперсии других причин $\sigma_{\Delta\theta\text{др}}^2$ и при взаимной независимости этих ошибок, получаем $\sigma_{\text{теор}}^2 = \sigma_{\Delta\theta\text{ФВ}}^2 + \sigma_{\Delta\theta\text{ОСШ}}^2 + \sigma_{\Delta\theta\text{др}}^2$, откуда можно определить величину $\sigma_{\Delta\theta\text{ФВ}}$: $\sigma_{\Delta\theta\text{ФВ}} = \sqrt{\sigma_{\text{теор}}^2 - \sigma_{\Delta\theta\text{ОСШ}}^2 - \sigma_{\Delta\theta\text{др}}^2}$.

Значение $\sigma_{\Delta\theta\text{ОСШ}}$ зависит от ОСШ на выходе ФАР. В частности, в случае измерения ОСШ в плоскости $\varphi = 90^\circ$ при отклонении луча ДН ФАР на

45° в этой плоскости получаем ОСШ, равное $40,7$ дБ. Для этого случая находим $\sigma_{\Delta\theta\text{ОСШ}} = 4,3'$. В итоге при условии $\sigma_{\Delta\theta\text{др}}^2 = 0$ получаем

$$\sigma_{\Delta\theta\text{ФВ}} = \sqrt{8,5^2 - 4,3^2} \leq 7,3'.$$

По графикам можно найти дисперсию σ_φ разброса фаз ФВ, использованных в макете ФАР: $\sigma_\varphi \leq 13,7^\circ$. Величина σ_φ – ошибка ФВ, обязанная разным причинам, в частности дискретности ФВ и нелинейности его ФВХ. Так как эти ошибки также можно считать практически независимыми, то ее значение представим следующим образом: $\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_{\text{нелин}}^2 + \sigma_{\text{дискр}}^2}$, где $\sigma_{\text{нелин}}$ – СКО ошибки ФВ из-за нелинейности ФВХ; $\sigma_{\text{дискр}}$ – СКО ошибки ФВ из-за дискретности задания фазы.

При использовании фазовращателей ФВФН1-30М дискрет установки фазы $\delta = 5,625^\circ$ и соответствует $\sigma_{\text{дискр}}^2 = \delta^2/12 = 2,64^\circ$. Тогда $\sigma_{\text{нелин}} \approx 13,6^\circ$, то есть практически совпадает с полной СКО фазовращателя.

Таким образом, основной составляющей СКО ФВ является $\sigma_{\text{нелин}}$. Последняя связана с технологическими и другими причинами при изготовлении ФВ. Для ее уменьшения необходимо улучшать технологию изготовления используемых в ФАР ИИФ. Выявленные закономерности могут быть использованы для повышения точности пеленгования с помощью рассмотренной ФАР за счет уменьшения случайных ошибок ФВ, то есть величины $\sigma_{\text{нелин}}$.

Полученные в данной главе результаты позволили установить возможность повышения точности пеленгования за счет внесения соответствующих поправок в результаты измерений.

Заключение

Проведенные в диссертации теоретические и экспериментальные исследования точности установки луча в проходных ФАР мм-диапазона в целях повышения точности пеленгования позволили получить следующие результаты.

1. Разработаны схема, макеты и модель анализа характеристик направленности проходной ФАР с использованием интегрированных излучателей-фазовращателей с круговой поляризацией и многоэлементного МИО с круговой поляризацией поля.

2. Теоретически и экспериментально исследованы характеристики суммарно-разностных ДН ФАР в пространственном секторе сканирования с углом при вершине 45° и установлена их зависимость от характеристик узлов и элементов ФАР. В частности, показано, что в подобной схеме ФАР в секторе сканирования возможны провалы в суммарной ДН на углах, существенно отличных от углов, определяемых размерами ячейки ФАР, что в свою очередь приводит к существенному изменению поляризационной структуры ДН ФАР на этих направлениях.

3. Проведено сравнение потенциальной точности пеленгования цифровых ФАР и ФАР с моноимпульсным облучателем и показано, что потенциальная точность обоих методов практически совпадает при отсутствии провалов в ДН системы излучателей-фазовращателей.

4. Установлено, что ошибки пеленгования в моноимпульсных сканирующих ФАР содержат детерминированную и случайную составляющие. Разработаны теоретическая и теоретически-экспериментальная методика определения детерминированной и случайной составляющих ошибок пеленгования с помощью управления начальными фазами ИИФ и получен алгоритм корректирования установки луча разностной ДН.

5. Показано, что использование коррекции алгоритма управления лучом позволяет существенно повысить точность пеленгования в малоразмерных ФАР вплоть до $1/40 \dots 1/50$ ширины ДН по суммарному каналу ФАР во всем секторе сканирования.

6. Сформулированы задачи дальнейшего совершенствования характеристик ИИФ и ФАР в целом, а также оптимизации алгоритмов управления лучом.

В целом, в диссертации решена актуальная задача совершенствования характеристик сканирующих малоразмерных моноимпульсных антенн, имеющая важное практическое значение при разработке РЛС сопровождения целей или их вывода на заданную траекторию.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

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

1. Манаенков Е.В., Пономарев Л.И., Васин А.А. Потенциальная точность определения угловых координат цели с использованием фазированных антенных решеток // Антенны. 2018. № 8. С. 40–48.

2. Манаенков Е.В., Пономарев Л.И., Васин А.А., Терёхин О.В. Реальная точность пеленгования целей с использованием фазированных антенных решеток // Антенны. 2019. № 4. С. 57–68.

3. Манаенков Е.В. Особенности разработки малогабаритных фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 1. С. 53–68.

4. Манаенков Е.В. Характеристики ФАР Ка-диапазона с электрическим сканированием // Антенны. 2020. № 1. С. 63–72.

Тезисы докладов на конференциях:

5. Манаенков Е.В., Гусев А.Л. Малогабаритные распределители мощности для моноимпульсных фазированных антенных решеток L- и S-диапазона // Сб. трудов XXVI Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2020). Воронеж. 2020. Т. 5. С. 10–17.

6. Манаенков Е.В., Иванов А.В. Двенадцатирупорный моноимпульсный облучатель со сверхширокой диаграммой направленности // Сб. трудов XXVI Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2020). Воронеж. 2020. Т. 4. С. 378–387.

7. Манаенков Е.В. Высокотехнологичные фазированные антенные решетки Ка-диапазона длин волн с электрическим сканированием луча // Сб. трудов XXVI Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2020). Воронеж. 2020. Т. 4. С. 363–370.

Патенты:

8. Патент на полезную модель № 59330. Моноимпульсный облучатель / *В.В. Сигитов, Б.С. Белугин, Ю.Н. Кузнецов, Е.В. Манаенков, М.С. Найок, А.Л. Степнов, В.Т. Толстых, А.В. Хомяков*. Оpubл. 10.12.2006. Бюл. № 34.
9. Патент на полезную модель № 90267. Моноимпульсный облучатель / *В.В. Сигитов, Б.С. Белугин, Ю.Н. Кузнецов, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов, А.Л. Степнов, М.Е. Семенов, А.В. Хомяков*. Оpubл. 27.12.2009. Бюл. № 36.
10. Патент на полезную модель № 95860. Радиолокационный модуль / *В.В. Сигитов, А.В. Хомяков, С.А. Курбатский, Б.С. Белугин, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.В. Ряполов*. Оpubл. 10.07.2010. Бюл. № 19.
11. Патент на полезную модель № 119548. СВЧ ферритовый фазовращатель отражательного типа / *В.П. Клапов, В.Д. Кожиченков, В.Д. Корольков, Е.В. Манаенков, Н.П. Милевский, А.В. Хомяков*. Оpubл. 20.08.2012. Бюл. № 23.
12. Патент на полезную модель № 156300. Элемент фазированной антенной решетки / *В.Л. Колесников, Е.В. Манаенков, А.С. Евтюхин, С.П. Пуляев, Н.Н. Селиверстов*. Оpubл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
13. Патент на полезную модель № 158944. СВЧ р-п диодный 4-х разрядный фазовращатель / *В.П. Клапов, В.Д. Кожиченков, В.Д. Корольков, Е.В. Манаенков, Г.В. Медовников, Н.П. Милевский, А.В. Хомяков*. Оpubл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
14. Патент на полезную модель № 184784. Устройство переизлучения сигналов / *А.В. Хомяков, В.П. Клапов, Г.В. Панченко, Е.В. Манаенков, А.С. Курбатский*. Оpubл. 08.11.2018. Бюл. № 31.
15. Патент на полезную модель № 188185. Модуль фазированной антенной решетки / *А.В. Хомяков, С.А. Курбатский, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, А.В. Новиков, А.В. Иванов, А.В. Болемонов*. Оpubл. 02.04.2019. Бюл. № 10.
16. Патент на изобретение № 2393598. Моноимпульсная система / *Е.В. Манаенков, А.В. Иванов, М.Е. Семенов*. Оpubл. 27.06.2010. Бюл. № 18.
17. Патент на изобретение № 2435254. Уголкоый изгиб волноводного тракта / *А.В. Хомяков, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов*. Оpubл. 27.11.2011. Бюл. № 33.
18. Патент на изобретение № 2435264. Радиолокационная антенная решетка / *С.А. Курбатский, Е.В. Манаенков, О.Ю. Илюхин, С.В. Денисов, Б.С. Белугин, А.В. Хомяков*. Оpubл. 27.11.2011. Бюл. № 33.
19. Патент на изобретение № 2438215. СВЧ-нагрузка / *В.В. Сигитов, А.В. Хомяков, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов*. Оpubл. 27.12.2011. Бюл. № 36.
20. Патент на изобретение № 2441301. Фазированная антенная решетка / *А.В. Иванов, Е.В. Манаенков, М.Е. Семенов, В.В. Сигитов, С.Н. Терехин, А.В. Хомяков*. Оpubл. 27.01.2012. Бюл. № 3.
21. Патент на изобретение № 2474019. Фазированная антенная решетка с электронным сканированием в одной плоскости / *А.В. Хомяков, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов*. Оpubл. 27.01.2013. Бюл. № 3.
22. Патент на изобретение № 2474041. Синфазный делитель мощности с неравным делением / *А.В. Иванов, Е.В. Манаенков, Г.В. Панченко, С.Н. Терехин, А.В. Хомяков*. Оpubл. 27.01.2013. Бюл. № 3.
23. Патент на изобретение № 2474934. Двухзеркальная антенна / *Г.В. Панченко, А.В. Новиков, М.Е. Семенов, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов, С.Н. Терехин*. Оpubл. 10.02.2013. Бюл. № 4.
24. Патент на изобретение № 2476962. Коаксиальная линия / *А.В. Хомяков, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов*. Оpubл. 27.02.2013. Бюл. № 6.
25. Патент на изобретение № 2501131. Элемент активной фазированной антенной решетки отражательного типа (варианты) / *А.В. Хомяков, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 10.12.2013. Бюл. № 34.
26. Патент на изобретение № 2517678. Коаксиально-волноводный переход / *А.В. Хомяков, С.А. Журавлев, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.Н. Терехин*. Оpubл. 27.05.2014. Бюл. № 15.
27. Патент на изобретение № 2524847. Детекторная головка / *В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, Д.В. Мартенюк, С.Г. Смирнов, С.Н. Терехин*. Оpubл. 10.08.2014. Бюл. № 22.

28. Патент на изобретение № 2524848. Возбудитель волны ТЕ01 / *А.В. Хомяков, Н.Н. Барыкин, В.П. Клапов, Д.С. Корлюков, Е.В. Манаенков, М.Е. Семенов*. Оpubл. 10.08.2014. Бюл. № 22.
29. Патент на изобретение № 2544764. Коаксиальный тракт / *А.В. Хомяков, Е.В. Манаенков, А.В. Иванов*. Оpubл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
30. Патент на изобретение № 2551822. Волноводный аттенюатор / *А.В. Хомяков, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.Н. Терехин*. Оpubл. 27.05.2015. Бюл. № 15.
31. Патент на изобретение № 2553092. Моноимпульсная система / *А.В. Хомяков, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.Н. Терехин*. Оpubл. 10.06.2015. Бюл. № 16.
32. Патент на изобретение № 2554521. Распределительная система для фазированной антенной решетки / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, В.В. Сигитов, С.Н. Терехин*. Оpubл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
33. Патент на изобретение № 2557474. Возбудитель волны Н01 / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
34. Патент на изобретение № 2566644. Волноводно-щелевая антенна / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 27.10.2015. Бюл. № 30.
35. Патент на изобретение № 2567875. Волноводное Е-плоскостное Т-образное разветвление / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
36. Патент на изобретение № 2571302. Направленный ответвитель / *А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков, Н.Н. Барыкин*. Оpubл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
37. Патент на изобретение № 2573195. Малошумящий приемно-усилительный модуль / *А.В. Хомяков, А.А. Гордничев, А.В. Иванов, А.В. Кириллов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
38. Патент на изобретение № 2575772. Способ измерения комплексных амплитуд возбуждения каналов фазированной антенной решетки / *А.В. Хомяков, С.А. Курбатский, Е.В. Манаенков, Л.Н. Пушкина*. Оpubл. 20.02.2016. Бюл. № 5.
39. Патент на изобретение № 2592054. Элемент фазированной антенной решетки / *В.Л. Колесников, Е.В. Манаенков, А.С. Евтюхин, С.П. Пуляев, Н.Н. Селиверстов*. Оpubл. 20.07.2016. Бюл. № 20.
40. Патент на изобретение № 2622241. Полотно антенное / *А.В. Хомяков, А.В. Болебонов, С.А. Курбатский, Е.В. Манаенков, А.В. Новиков*. Оpubл. 13.06.2017. Бюл. № 17.
41. Патент на изобретение № 2632477. Моноимпульсная радиолокационная станция с автоматической калибровкой / *А.В. Хомяков, В.П. Клапов, С.А. Курбатский, Е.В. Манаенков, С.В. Ряполов, В.В. Сигитов*. Оpubл. 05.10.2017. Бюл. № 28.
42. Патент на изобретение № 2653088. Волноводный выключатель / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, С.А. Журавлев, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.Н. Терехин*. Оpubл. 07.05.2018. Бюл. № 13.
43. Патент на изобретение № 2653093. Фазовращатель / *А.В. Хомяков, Н.Н. Барыкин, А.Л. Гусев, С.А. Журавлев, А.В. Иванов, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, С.Н. Терехин*. Оpubл. 07.05.2018. Бюл. № 13.
44. Патент на изобретение № 2654989. Волноводный направленный ответвитель / *А.В. Хомяков, Л.И. Алешичева, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 23.05.2018. Бюл. № 15.
45. Патент на изобретение № 2668340. Двойной волноводный тройник / *А.В. Хомяков, А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков*. Оpubл. 28.09.2018. Бюл. № 28.
46. Патент на изобретение № 2668622. Уголковый изгиб волноводного тракта / *А.Л. Гусев, А.В. Иванов, Е.В. Манаенков, А.В. Хомяков*. Оpubл. 02.10.2018. Бюл. № 28.
47. Патент на изобретение № 2687880. Волноводная нагрузка / *А.В. Хомяков, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, А.Л. Гусев*. Оpubл. 16.05.2019. Бюл. № 14.
48. Патент на изобретение № 2704209. Модуль фазированной антенной решетки / *А.В. Хомяков, С.А. Курбатский, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, А.В. Новиков, А.В. Иванов, А.В. Болебонов*. Оpubл. 24.10.2019. Бюл. № 30.
49. Патент на изобретение № 2705790. Устройство юстировочное / *В.В. Сигитов, А.В. Хомяков, В.П. Клапов, Е.В. Манаенков, Р.В. Сикачев, С.Г. Смирнов, М.И. Исаков*. Оpubл. 12.11.2019. Бюл. № 32.