

0- 786745

На правах рукописи

НИЗАМУТДИНОВ РАДИС РАДИФОВИЧ



**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ
СФОКУСИРОВАННЫХ АНТЕНН ДЛЯ РАДИОВОЛНОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Казанском Государственном техническом университете
им. А.Н. Туполева

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РТ,
доктор технических наук, профессор
Седельников Юрий Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент Анфиногентов
Владимир Иванович, Казанский государственный
технический университет им. А.Н. Туполева,
г. Казань

кандидат технических наук, доцент Маслов
Михаил Юрьевич, Поволжская государственная
академия телекоммуникаций и информатики,
г. Самара

Ведущая организация: ОАО «Информационные спутниковые системы
им. М.Ф. Решетнева», г. Железнодорожск

Защита состоится 4 марта 2011 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.079.04 при Казанском государственном техническом
университете им. А. Н. Туполева по адресу:
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью
организации, высылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного технического университета имени А. Н. Туполева.

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте Казанского
государственного технического университета имени А. Н. Туполева www.kai.ru.

Автореферат разослан 25 марта 2011 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000582858

Ученый секретарь
диссертационного совета

Седов С. С.

Актуальность темы диссертации. В ряде технических приложений, в частности микроволновых технологиях, медицинском приборостроении, ультразвуковом неразрушающем контроле и др. находят применение системы возбуждения волновых полей, реализующие принцип фокусировки излучения в зоне Френеля. Указанные устройства используются как для повышения интенсивности поля в пределах ограниченной области пространства, так и в локационной диагностике для обеспечения требуемой пространственной селекции в обследуемом объеме. Сфокусированные системы могут выполняться с как использованием фокусирующих линз или зеркал, или решеток излучателей, так и в виде виртуальных антенн с синтезированной апертурой.

Апертурная теория непрерывных и дискретных антенн в дальней зоне хорошо развита, а ее базовые положения давно стали классическими, вошедшими в учебную литературу. Волновые поля, создаваемые сфокусированными апертурами, отличаются характером связи своих основных показателей с видом и параметрами апертурных распределений. Однако к настоящему времени многие свойства волновых полей в зоне Френеля, в особенности в диссипативных средах, в достаточной мере не изучены. Недостаточное развитие теории, а также недостаточная осведомленность специалистов в отношении свойств сфокусированных антенн не позволяют в полной мере на практике реализовать их потенциальные возможности.

Таким образом, задача определения свойств пространственных распределений сфокусированных антенн в их связи с геометрическими соотношениями и параметрами апертурных распределений представляет собой задачу, актуальную для ряда технических приложений: микроволновых технологий, радиоволновой диагностики, неразрушающего контроля.

Цель и задачи исследований. Диссертационная работа посвящена исследованию сфокусированных полей линейной антенны. Целью работы является повышение технических показателей локационных, диагностических и технологических устройств, использующих при излучении или приеме принцип фокусировки поля в зоне Френеля.

Задача, решаемая в диссертации, заключается исследования характеристик сфокусированных линейных антенн для аппаратуры микроволновых технологий и радиочастотной диагностики в зависимости от геометрических размеров апертуры, положения точки фокусировки и характера амплитудно-фазового распределения. В их число входят:

1. Исследование влияния амплитудного распределения на характеристики сфокусированного поля, оптимизация КНД.
2. Определение размеров области фокусировки, уровня боковых лепестков и их зависимости от электрических размеров и параметров амплитудного распределения.
3. Исследование влияния фазового распределения, поляризации и потерь в среде распространения на характеристики поля.

4. Снижение уровней боковых лепестков путем управления амплитудно-фазовым распределением в апертуре, в том числе и с использованием суммарно-разностных сфокусированных полей.
5. Выработка практических рекомендаций.

Объект исследования. Антенны технических средств микроволновых технологий, радиоволновой диагностики и неразрушающего контроля.

Предмет исследования. Характеристики сфокусированных линейных антенн.

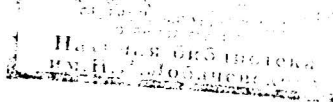
Методы исследования. В работе использованы численные методы прикладной электродинамики. Результаты получены с использованием вычислительных алгоритмов реализованных в пакете MathCad. Тестирование и анализ полученных результатов проводились с применением электронных таблиц MS Excel и математического пакета MathCad.

Научная новизна работы и личный вклад автора. Новизна полученных научных результатов заключается в следующем:

1. Разработаны модели линейной антенны и средства моделирования, с использованием которых определены зависимости КНД, размеров области фокусировки и уровни боковых лепестков от электрических размеров апертуры и относительного фокусного расстояния (ОФР).
2. Получены оценки влияния потерь в среде и векторного характера поля на основные характеристики сфокусированных полей.
3. Исследованы характеристики сфокусированных полей для различных положений точки фокусирования и установлены границы области электронного сканирования в зоне Френеля.
4. Изучены эффекты подобия и смещения максимума поля от точки фокусировки, обосновано использование равномерного амплитудного распределения, как оптимального по основным параметрам сфокусированного поля.
5. Показана возможность формирования пространственных распределений сфокусированных полей разностного типа и предложено использование их для повышения пространственного разрешения и подавления боковых лепестков

Основные научные положения и результаты, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, получены и сформулированы автором впервые и лично. Наличие соавторов отражено в списке литературы, который включает перечень публикаций соискателя.

Практическая ценность и реализация результатов диссертации. Полученные в ходе исследования результаты и выработанные на их основе рекомендации позволяют улучшить энергетические показатели, а также показатели точности и пространственной разрешающей способности технологических и диагностических систем, использующих антенны, сфокусированные в зоне Френеля. Ряд результатов в виде конкретных расчетных данных, рекомендаций и технических предложений использованы при выполнении НИОКР, выполненных по тематике ИСС им. Академика



Решетнева в 2010 г., а также в учебном процессе Национального исследовательского университета в рамках ПНР-5.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечиваются корректным применением методов расчета поля излучения, обоснованностью упрощающих допущений, а также совпадением результатов с известными данными.

Апробация результатов работы и публикации. Основные положения диссертации и полученные автором результаты докладывались на XVI и XVIII МНТК Туполевские чтения (Казань, 2008 г. и 2010г.), МНТК «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». (Москва, 2007 г.). Основные положения и результаты диссертации отражены в 8 публикаций: включая 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 6 тезисов докладов на международных и российских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 155 страниц (без приложений) в машинописном виде, в том числе 107 иллюстраций и 17 таблиц. Список литературы включает 105 наименований. Автор выражает благодарность доц. к.т.н. Потаповой О.В. за научные консультации.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Результаты исследования характеристик сфокусированной линейной апертуры, а именно КНД, размеры пятна фокусирования и параметры боковых лепестков.
2. Результаты исследований эффектов, связанных с влиянием фазового распределения, поляризации и потерь в среде распространения на характеристики сфокусированных полей.
3. Формирование суммарно-разностных сфокусированных полей и возможности использования их для снижения УБЛ.
4. Практические рекомендации по использованию сфокусированной линейной антенны в зоне Френеля в технических приложениях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, решаемые задачи, приведена структура диссертации.

В первой главе представлены особенности поля антенны в зоне Френеля характерные сферы применения сфокусированной антенны (СФА) – в радиотехнике, в аппаратуре микроволновых технологий, в неразрушающем контроле и медицине, беспроводной передачи энергии, в гидролокации. Дан краткий анализ современного состояния теории СФА.

Зона Френеля (по аналогии с оптической терминологией, для антенны, сфокусированной в бесконечности) является промежуточной между реактивной и дальней зонами излучения. Здесь пространственное распределение поля (диаграмма направленности) зависит от расстояния до антенны.

Смысл фокусировки состоит в том, что в режиме передачи в апертуре обеспечиваются такие фазовые соотношения, при которых в заданной точке создается поле с максимальной интенсивностью. При этом волны, излучаемые различными точками апертуры, складываются синфазно в указанной точке - так называемой точке фокусировки.

Аналогично, при приеме реализуется такое весовое суммирование принимаемых колебаний, которое обеспечивает синфазное сложение волн, исходящих из точки фокусировки.

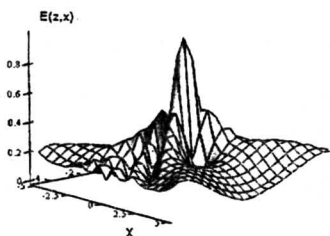


Рис. 1. Типичная картина пространственного распределения интенсивности поля вблизи точки фокусирования

На расстояниях, соизмеримых с размером апертуры, пространственное распределение интенсивности поля, как величина, аналогичная диаграмме направленности антенны в дальней зоне, представляет собой более или менее узкий пик, окруженных всплесками меньшей интенсивности – боковыми лепестками (рис. 1).

Указанный характер волнового поля является основой для использования принципа фокусировки в ряде технических приложений.

Описываются существующие и перспективные сферы применения сфокусированных систем. Сфокусированные антенные решетки в технике радиосвязи и радиолокации - организация наземных пунктов связи в виде разреженных крупноапертурных активных решеток, фокусируемых соответственно текущему положению подвижного объекта. Потенциальными преимуществами перед традиционными способами построения являются не только улучшение энергетических показателей радиолинии, но и повышенная надежность системы. Аналогичные решения возможны для связи с группой малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

Сфокусированные решетки в аппаратуре микроволновых технологий. Для создания в объеме объекта обработки электромагнитных полей с требуемой пространственной структурой успешно используется как принцип многоэлементного когерентного возбуждения, так и некогерентного.

Неразрушающий контроль и медицина. В ряде случаев для радиоволнового и акустического эхолокационного контроля характерны требования возбуждения волнового поля и прием отраженных сигналов от нерегулярностей, находящихся на сравнительно небольшом удалении от антенны. В этих целях в последнее время стали использоваться решетки излучателей, в том числе управляемые, аналогичные фазированным антенным решеткам, а также антенные решетки с синтезированной апертурой.

Беспроводная передача энергии - с взаимно сфокусированными приемной и передающей излучающими системами (беспроводная передача с циклотронным преобразователем энергии электромагнитной волны в постоянный ток). Описано оружие нелетального действия, использующее принцип СФА - система Active Denial System (ADS) – нелетальное оружие.

В гидролокации - определении места нахождения подводного объекта либо по звуковым сигналам, испускаемым самим объектом (пассивная гидролокация). Пространственная избирательность фокусирующих гидроакустических антенн образуется с помощью отражающих или преломляющих границ или сред, производящих фокусировку звуковой энергии, сопровождающуюся преобразованием фронта волны (например, из сферического в плоский).

Дан краткий обзор состояния теории сфокусированных антенн. Отмечено, что многие вопросы, относящиеся к свойствам сфокусированных полей в зависимости от электрических размеров апертуры, свойств среды, геометрических соотношений и характера амплитудно-фазового распределения в апертуре изучены в недостаточной мере. Указанные обстоятельства определяют необходимость разработки элементов апертурной теории антенн для зоны Френеля. Помимо объяснения общего качественного характера влияния формы, размеров апертур и вида амплитудно-фазового распределения на характерные параметры интенсивности поля в окрестности области фокусировки данная теория должна установить предельные соотношения между параметрами апертур и интенсивности сфокусированных волновых полей.

Вторая глава посвящена исследованию основных параметров линейной антенны сфокусированной вдоль нормали к апертуре. Показаны задачи решаемые теорией СФА. Подробно описана модель СФА. Рассмотрено влияние амплитудного распределения на характеристики сфокусированного поля. Определено оптимальное амплитудное распределение по КНД.

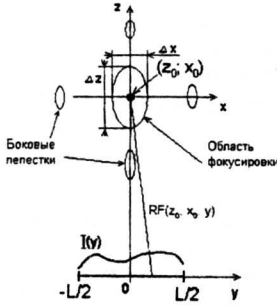


Рис. 2. Линейная апертура, сфокусированная в точку $(x_0; z_0)$

Амплитуда волнового поля основной поляризации в точке $(x; z)$ (с точностью до постоянной) описывается выражением (1), представляющими собой обобщение известных соотношений апертурной теории антенн для зоны Френеля:

$$E(x; z) = \int_{-L/2}^{L/2} I(x)g(x; z) \frac{e^{-\alpha R(x; z) - \beta(R(x; z) - R(x_0; z_0))} dx}{R(x; z)CL(x; z; \xi)} \quad (1)$$

где, $I(x)$ – апертурное амплитудное распределение, $g(x; z)$ – диаграмма направленности элементарного источника, $R(x; z)$ и $R(x_0; z_0)$ – расстояния до точек наблюдения и фокусировки соответственно, $CL(x; z; \xi)$ – величина, учитывающая поляризационные свойства парциальных волновых полей в точке наблюдения;

$CL(x; z; \xi) = \sqrt{1 + b_x \left(\frac{x - \xi}{z_0 + z} \right)^2}$, $b_x = 1$ и $b_x = 0$ для электромагнитных волн, поляризованных в плоскости XOZ и YOZ соответственно, $b_x = 1$ – для продольных акустических волн.

Показано, что модель (1) справедлива для расстояний от апертуры превышающих значения порядка длины волны.

Пространственное распределение $|E(x; z)|$ аналогично по форме двумерной диаграмме направленности антенны в дальней зоне (рис. 3).

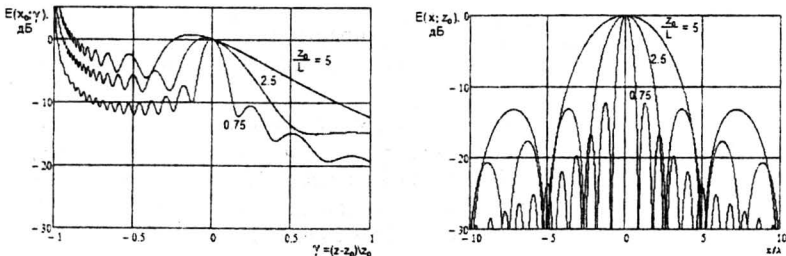


Рис. 3. Радиальные (слева) и поперечные (справа) зависимости $E(x; z)$ [дБ] при различных относительных фокусных расстояниях z_0/L , $L\lambda=50$ для равномерного амплитудного распределения

Сформулированы основные задачи анализа апертурных свойств:

- определение характера влияния амплитудного распределения на характер и параметры сфокусированного поля;
- определение влияния фазового распределения, включая оценки возможностей сканирования фокальным пятном.

Введена величина коэффициента направленного действия, как показателя пространственной концентрации поля для зоны Френеля, и получена зависимость ее от вида амплитудного распределения и относительного фокусного расстояния (z_0/L):

$$КНД_{\text{фок опт}} = \frac{2L}{\lambda} \cdot КИП_{\text{фок опт}} = \frac{2L}{\lambda} \cdot \frac{\left| \int_{-L/2}^{L/2} \frac{I(y)dy}{\sqrt{1+(y/z_0)^2}} \right|^2}{L \int_{-L/2}^{L/2} I(y)^2 dy} \quad (2)$$

Показано, что максимально возможное значение КНД равно $2\pi z_0/\lambda$ и достигается при амплитудном распределении:

$$I(y)_{\text{опт}} = \frac{1}{\sqrt{1+(y/z_0)^2}} \quad (3)$$

и получены расчетные зависимости $КИП_{\text{фок}}(z_0/L)$ для оптимального и ряда типичных амплитудных распределений (рис. 4).

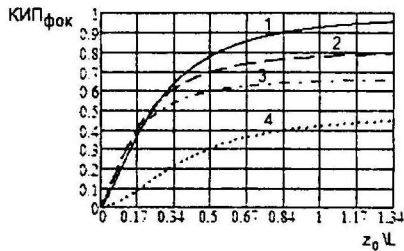


Рис. 4. Зависимость $КИП_{\text{фок}}$ от относительного фокусного расстояния для разных амплитудных распределений при $L\lambda = 50$ (1 – Равномерное; 2 – Косинус; 3 – Косинус в квадрате; 4 – U-образное)

Анализ зависимостей КНД позволил выявить ряд характерных свойств, отличающих поведение КНД от аналогичных закономерностей для дальней зоны. Наиболее существенными являются следующие:

- Величина КНД в зоне Френеля существенно зависит от фокусного расстояния, монотонно убывая по мере уменьшения его и асимптотически стремясь к значению для дальней по мере удаления точки фокусировки от апертуры. Для линейных апертур характерно, что увеличение напряженности поля в точке фокуса по сравнению с использованием ненаправленного излучателя (т.е. $КНД \geq 1.5$) имеет место практически при любых фокусных расстояниях. Это означает, что в целях формирования более интенсивного волнового поля в заданной точке использование принципа фокусировки может считаться целесообразным практически при любых фокусных расстояниях.

- В отличие от случая дальней зоны максимальное значение КНД антенны, сфокусированной в зоне Френеля, является ограниченным. Физически это может быть объяснено снижением вклада от отдаленных участков апертуры по мере увеличения ее длины (рис. 5).

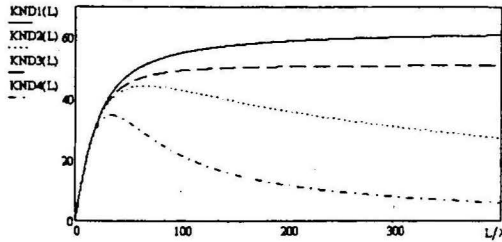


Рис. 5. Зависимость КНД от L/λ при $z_0=10\lambda$. 1 – оптимальное, 2 – равномерное, 3 – спадающее, 4 – возрастающее.

Исследованы зависимости размеров фокального пятна от геометрических соотношений и вида амплитудного распределения поля в апертуре в режиме фокусировки в направлении нормали к апертуре. В этих целях использован эффект подобия: показано, что размеры фокального пятна практически одинаковы в зависимости от Z_0/L для кратных апертур (рис. 6).

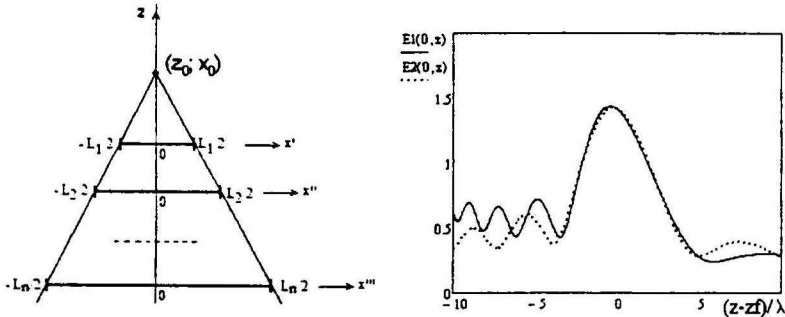


Рис. 6. Подобие в характеристиках фокального пятна для разных апертур и продольная (справа) зависимость распределения поля E_1 и E_2 в окрестности фокуса для апертур $L_1=20\lambda$ и $L_2=40\lambda$ при $z_0=0,65L$

На основании численных расчетов установлены эмпирические оценки для поперечного и продольного размеров пятна по уровню -3дБ. Для равномерного амплитудного распределения:

$$\Delta x \lambda \approx 0.43 + 0.4 \cdot (z_0/L) \quad (4)$$

$$\Delta z \lambda \approx 1.25 + 7 \cdot (z_0/L)^2 \quad (5)$$

Для других типичных видов амплитудных распределений указанные значения увеличиваются в KPL_x и KPL_z раз соответственно и получены оценочные значения указанных коэффициентов.

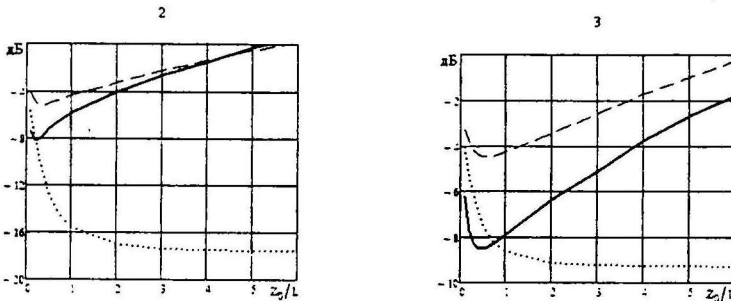
Исследовано влияние характера амплитудного распределения на параметры (уровни) боковых лепестков. Установлено, что указанные зависимости имеют более сложный характер и существенно отличаются от

известных закономерностей для дальней зоны. Во-первых, здесь не существует однозначной связи между достигаемыми значениями УБЛ и степенью расширения области фокусировки.

Рис. 7. УБЛ в зависимости от ОФР:

- 1 – равномерное АР;
 2 – косинус на пьедестале;
 3 – возрастающее АР, где

— - УБЛ z , дБ;
 - УБЛ x , дБ;
 --- - УБЛ max , дБ.



Во-вторых, это различный характер влияния формы амплитудного распределения на параметры боковых лепестков в поперечном и продольном направлениях. В поперечном направлении общий характер зависимости повторяет аналогичные для дальней зоны: спадающим распределениям соответствуют меньшие уровни, возрастающим и немонотонным – более высокие значения. Для продольного направления имеет место, по крайней мере, другой характер зависимости: спадающим распределениям соответствуют большие уровни боковых лепестков, а меньшие – наоборот, возрастающим к краям распределениям. Кроме того, максимальные по уровню боковые лепестки находятся в диагональных направлениях, и именно они являются определяющими для пространственной характеристики поля по уровню боковых лепестков. По мере увеличения ОФР, $УБЛ_{max}$ постепенно приближается к $УБЛ_z$.

В-третьих, существует выраженная зависимость уровней боковых лепестков от относительного фокусного расстояния. Для поперечной плоскости по мере увеличения Z_0/L уровни боковых лепестков убывают до значений УБЛ в дальней зоне. Для продольной плоскости наблюдается обратная картина: для относительных фокусных расстояний больших 1, уровни боковых лепестков возрастают. При этом обнаруживается, что имеет смысл фокусировать поле в

пределах до 5.6 относительных фокусных единиц. При дальнейшем увеличении фокусного расстояния выраженного максимума поля уже не наблюдается.

Третья глава посвящена исследованию влияния фазового распределения на основные параметры сфокусированных антенн. Также в главе 3 рассматривается влияние поляризации элементарного источника.

Для случая дальней зоны особую роль играет линейное фазовое распределение, обеспечивающее максимальную направленность излучения в направлении, отличном от нормали. Его аналогом в зоне Френеля является фазовое распределение, обеспечивающее синфазное сложение полей элементарных участков апертуры в заданной точке $(x_0; z_0)$ в зоне Френеля. В главе исследуются изменения КНД, размеров фокального пятна и параметров боковых лепестков для фазовых распределений, обеспечивающих указанную фокусировку.

Показано, что максимальный КНД в точке $(x_0; z_0)$ обеспечивается для оптимального амплитудного распределения, зависящего от размеров апертуры и положения точки фокуса, и найдено его значение:

$$КНД_{opt}(x_0; z_0) = \frac{L}{\lambda} \cdot \left(\frac{\arctg((L/2 - x_0)/z_0)}{L/2z_0} + \frac{\arctg((L/2 + x_0)/z_0)}{L/2z_0} \right) \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить снижение предельного значения КНД при изменениях положения точки фокусировки.

Установлено, что при фокусировке поля излучения в заданную точку $(x_0; z_0)$ согласно требованию синфазного суммирования парциальных полей в указанной точке, положение максимума интерференционной картины поля в зоне Френеля не совпадает с указанным значением.

Явление смещения максимума направленности поля в продольном и поперечном направлениях, которое происходит из-за различия в расстояниях между дальними и ближними элементами апертуры от точки фокуса. Положение максимума интенсивности поля при фокусировке в точку с координатами $(x_0; z_0)$ путем возбуждения апертуры токами с фазовым распределением $\Psi(y) = k \text{RF}(x_0; z_0; y)$ оказывается смещенным в сторону апертуры в продольном направлении и оси системы — в поперечном направлении. Величины смещения имеют значения тем большие, чем больше величина относительного фокусного расстояния (рис. 8).

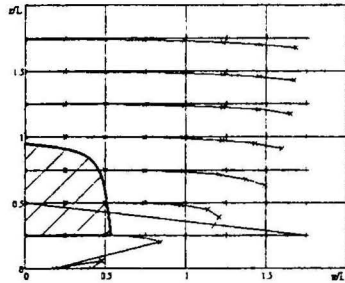


Рис. 8. Смещение максимума поля при сканировании от нормали к апертуре
направо: + — точки фокуса;
x — максимумы поля; помеченная область — граница области фокусировки, внутри которой обеспечиваются приемлемые свойства поля. Размер апертуры $L/\lambda = 100$, амплитудное распределение — равномерное

Показано, что в пределах зоны возможного перемещения (сканирования) фокального пятна величина смещения может быть скорректирована путем выбора точки фокуса дальше на $0 \lambda \dots 0,34 \lambda$ для x_0 и на $0,02 \lambda \dots 1,29 \lambda$ для z_0 .

Изменение положения точки фокусировки в направлении от апертуры в продольном направлении и от оси симметрии в поперечном направлении приводит к расширению фокального пятна и изменению его формы, проявляющегося в его повороте относительно апертуры. Получены оценки расширения фокального пятна в зависимости от направления и величины смещения (x_0 ; z_0). Показано, что изменение положения точки фокусировки приводит также к существенному изменению уровней боковых лепестков.

Определены границы зон, для которых при перемещении точки фокусировки основные параметры – КНД, размеры фокального пятна и уровни боковых лепестков остаются в допустимых пределах. Установлено, что для сканирования наиболее существенным ограничивающим фактором является расширение продольного размера фокального пятна и на этой основе определены границы области возможного сканирования (рис. 9).

В рамках полученной области уровень наибольшего бокового лепестка достигает -3дБ ближе к концам апертуры и дальше, возрастая от -5,37дБ от центра апертуры (рис. 10).

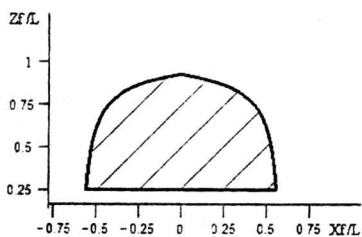


Рис. 9. Область приемлемого расширения продольного размера фокусного пятна

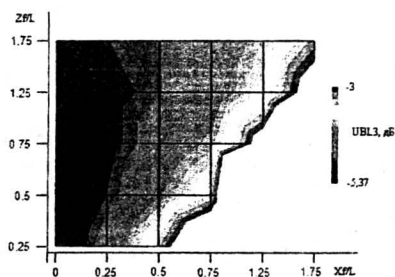


Рис. 10. Наибольший УБЛ при сканировании области

Исследовано влияние векторного характера поля на основные свойства сфокусированных полей. Отличия от свойств, описанных выше, заключаются в наличии кроссполаризованных составляющих поля и некотором изменении в параметрах сфокусированных полей по основной поляризации.

По основной векторной компоненте сфокусированное поле отвечает основным закономерностям, присущим полям со спадающим к краям апертуры амплитудным распределением. Отличия проявляются в следующем:

- КНД оказывается меньше расчетных значений, полученных для случая скалярного поля;
- снижается УБЛ в поперечном направлении при незначительном изменении значений для продольного направления.

Распределение сфокусированного поля кроссполаризованной компоненты подобно диаграмме направленности в дальней зоне, т.е. с нулевыми значениями

на оси симметрии. В главе показано, что перечисленные отличия становятся заметными с практической точки зрения только для малых относительных фокусных расстояниях и приводятся соответствующие числовые оценки.

В *четвертой главе* рассмотрена задача снижения уровня боковых лепестков путем управления АФР в апертуре и с использованием суммарно-разностных сфокусированных полей. Характер зависимости уровня боковых лепестков от формы амплитудного распределения имеет сложный характер. Так, для спадающих к краям распределений характерны меньшие значения в поперечной плоскости, а в продольной – большие. Причем, чем быстрее распределение амплитуд спадает к краям, тем большее (меньшее) значение принимает УБЛ в продольной (поперечной) плоскости. Для возрастающих к краям и немонотонных распределений ситуация обратная. Кроме того, в отличие от случая дальней зоны параметры боковых лепестков в значительной мере зависят от относительного фокусного расстояния.

Для сфокусированных полей становится невозможным установить амплитудное распределение, оптимальное по компромиссу между значениями размеров фокального пятна и параметров боковых лепестков.

Поэтому можно было бы говорить только об оптимальной функции для конкретных L и z_0/L , что снижает практическую целесообразность решения подобной задачи. Фактически речь может идти о некотором семействе амплитудных распределений, оптимальных в области сканирования в зоне Френеля.

Анализ, проведенный в работе, показал, что возможностью снижения уровня боковых лепестков сфокусированных апертур путем соответствующего выбора амплитудно-фазового распределения, оказываются не столь значительными по сравнению с диаграммой направленности антенн в дальней зоне. На основании сравнения свойств полей для ряда типовых амплитудных распределений, а также решения частных задач по минимизации боковых лепестков при допустимом расширении фокального пятна, сделано следующее заключение. Квазиоптимальным решением, обеспечивающим разумный компромисс, является равномерное амплитудное распределение. Ему соответствуют сфокусированные поля с КНД, отличающимся от максимально достижимого не более 2-3% по нормали к апертуре и уровни боковых лепестков не более -3дБ для всего диапазона значений положений точки фокусировки, т.е. от минимально возможного до величин порядка нескольких размеров апертуры.

Рассмотрены направления мер по снижению уровней боковых лепестков, возможных в эхолокационной диагностике. В качестве наиболее действенной предложено использование нелинейной обработки, в основу которой положены свойства выше описанных сфокусированных полей (суммарных) и сфокусированных полей разностного типа. Сфокусированное поле разностного типа характеризуется нулевым значением интенсивности в точке фокусировки, т.е. в точке максимума поля суммарного типа. В главе рассмотрена возможность формирования сфокусированных полей с указанными свойствами.

Показано, что в отличие от случаев дальней зоны для формирования пространственных распределений разностного типа недостаточно возбуждения соответствующего (например, асимметричного) фазового распределения и указан способ определения требуемого амплитудно-фазового апертурного распределения.

Предложен способ аппаратного подавления боковых лепестков в приемной системе, аналогичный совместному использованию приема с суммарной и разностной диаграммами направленности. Для заданного пространственного положения точки фокусировки (\vec{r}_0) осуществляется прием в условиях, соответствующих формированию двух пространственных распределений суммарного $E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0)$ и двух разностных - продольного $E_{\Delta Z}(\vec{r}; \vec{r}_0)$ и поперечного $E_{\Delta X}(\vec{r}; \vec{r}_0)$. Сигнал считается принятым (соответствует основному пику пространственного распределения суммарного типа), если его амплитуда превышает значение, соответствующее приему в канале с пространственным распределением разностного типа:

$$E_{\text{вых}}(\vec{r}; \vec{r}_0) = \begin{cases} E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0), E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0) \geq E_{\Delta Z}(\vec{r}; \vec{r}_0) \wedge E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0) \geq E_{\Delta X}(\vec{r}; \vec{r}_0); \\ 0, E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0) \leq E_{\Delta Z}(\vec{r}; \vec{r}_0) \wedge E_{\Sigma}(\vec{r}; \vec{r}_0) \leq E_{\Delta X}(\vec{r}; \vec{r}_0). \end{cases} \quad (7)$$

На рис. 11 показаны результаты моделирования процесса приема в соответствие с правилом (7), подтверждающее возможность эффективного подавления боковых лепестков.

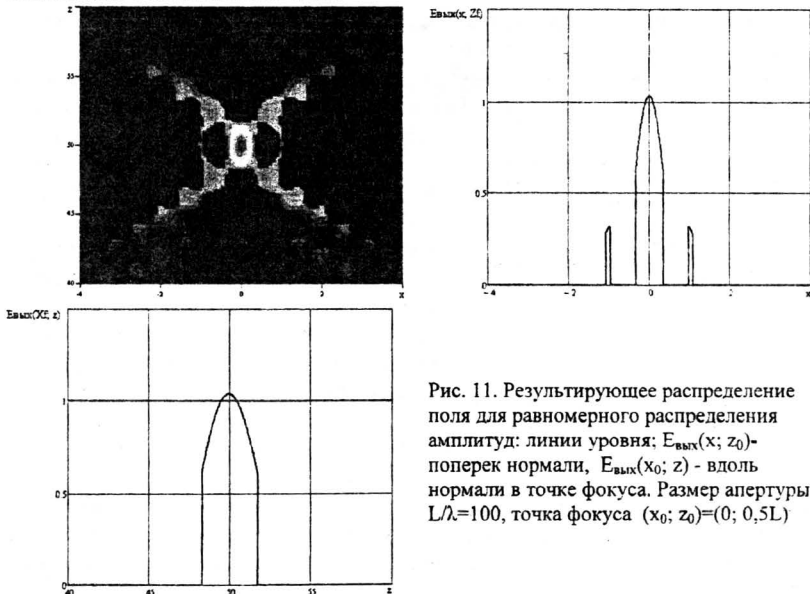


Рис. 11. Результирующее распределение поля для равномерного распределения амплитуд: линии уровня: $E_{\text{вых}}(x; z_0)$ - поперек нормали, $E_{\text{вых}}(x_0; z)$ - вдоль нормали в точке фокуса. Размер апертуры $L/\lambda=100$, точка фокуса $(x_0; z_0)=(0; 0,5L)$

В главе 4 также рассмотрены особенности сфокусированных полей линейных антенн с учетом затухания волн в среде.

Наличие затухания существенно влияет как на размеры области фокусировки, так и параметры боковых лепестков. Динамику изменения указанных параметров по мере увеличения потерь $\alpha\lambda$ наглядно демонстрируют рис. 12 – 14.

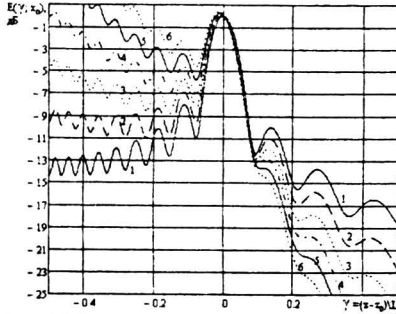


Рис. 12 Распределение интенсивности поля в направлении нормали к апертуре при различных значениях $\alpha\lambda$: 1) $\alpha\lambda=0$; 2) $\alpha\lambda=0,01$; 3) $\alpha\lambda=0,02$; 4) $\alpha\lambda=0,03$; 5) $\alpha\lambda=0,04$; 6) $\alpha\lambda=0,05$ при $L/\lambda=100$ и $(x_0, z_0)=(0, 0,5L)$.

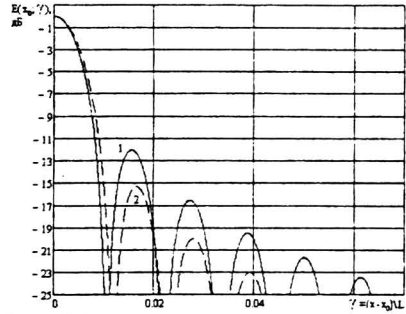


Рис. 13. Распределение интенсивности поля в направлении параллельном апертуре при различных значениях $\alpha\lambda$: 1) $\alpha\lambda=0$; 2) $\alpha\lambda=0,05$ при $L/\lambda=100$ и $(x_0, z_0)=(0, 0,5L)$.

При малых потерях $\alpha\lambda \leq 0.01 \dots 0.02$ имеет место плавное расширение области фокусировки, сопровождающееся снижением УБЛ в поперечном и ростом его в продольном направлениях.

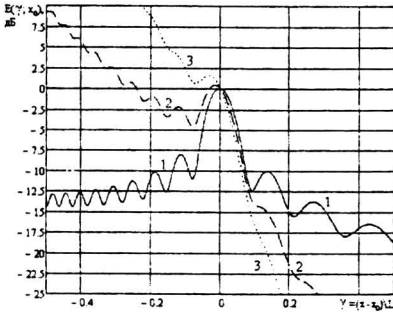


Рис. 14. Распределение интенсивности поля в направлении нормали к апертуре при различных значениях $\alpha\lambda$: 1) $\alpha\lambda=0$; 2) $\alpha\lambda=0,05$; 3) $\alpha\lambda=0,1$ при $L/\lambda=100$ и $(x_0, z_0)=(0, 0,5L)$.

При больших потерях наблюдается быстрая деградация выраженного эффекта фокусировки в продольном направлении и по достижению значений порядка $\alpha\lambda=0,1 \dots 0,2$ происходит почти полная его утрата (рис. 15). Отмеченный факт имеет важное практическое следствие: в локационных приложениях определение продольной координаты путем сканирования точки фокуса в направлении нормали к апертуре возможно только в средах с относительно низкими потерями.

Наличие предельного значения допустимого затухания в среде $\alpha\lambda \leq 0,05 \dots 0,1$ связано с утратой выраженных фокусирующих свойств, имеющих место для линейных апертур место при коэффициентах затухания более указанных значений.

Затухание в среде распространения приводит к существенному снижению КНД. Максимальное значение КНД достигается при некоторых конечных размерах апертуры, причем дальнейшее увеличение их ведет лишь к снижению

Затухание в среде распространения приводит к существенному снижению КНД. Максимальное значение КНД достигается при некоторых конечных размерах апертуры, причем дальнейшее увеличение их ведет лишь к снижению КНД. Указанное значение можно считать оптимальным при требовании обеспечения максимально возможной концентрации энергии в области фокусировки.

В пятой главе представлена краткая сводка основных свойств СФА. Описано применение СФА в эхолокационной диагностике. Предложено применение СФА в задаче контроля материалов рефлекторов космических антенн.

В заключении сформулированы выводы по работе. *В приложении* приведены данные о практическом использовании результатов диссертации.

Выводы

Совокупность основных результатов работы представляет собой решение задачи исследования характеристик сфокусированных линейных антенн для аппаратуры микроволновых технологий и радиочастотной диагностики. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Определена зависимость КНД линейных сфокусированных антенн от электрических размеров апертуры, относительного фокусного расстояния и вида амплитудного распределения. Показано, что значение КНД для заданного относительного расстояния ограничено. Определены оптимальное по КНД амплитудное распределение и максимально достижимое значение КНД.
2. Получены оценки размеров фокального пятна и уровня боковых лепестков от относительного фокусного расстояния и вида амплитудного распределения. Установлено, что минимально достижимый уровень боковых лепестков имеет порядок $-10\dots-15$ дБ.
3. Исследованы возможности сканирования в зоне Френеля. Показано, что при изменении точки фокусировки происходит изменение размеров фокального пятна, его ориентации, КНД и боковых лепестков. Обнаружено явление смещения максимума интенсивности поля от точки фокуса. Получены предельные размеры области сканирования.
4. Установлен характер влияния потерь в среде и поляризации на характеристики сфокусированного поля. Наличие потерь ведет к расширению фокального пятна, росту боковых лепестков и снижению максимально достижимого КНД. Показано, что наличие потерь ограничивает целесообразный размер апертуры. Установлено, что повышение концентрации поля в точке фокуса может быть достигнуто для любых значений затухания. Использование в локационных целях целесообразно при умеренных значениях потерь $\alpha\lambda \leq 0,05\dots 0,1$. Оценены кроссполаризационные эффекты и показано, что их влияние существенно только для близкого расположения точки фокуса или значительных смещений от оси симметрии.
5. Определены способы формирования пространственного распределения поля разностного типа в продольном и поперечном направлениях.

- предложен и апробирован способ аппаратурного подавления боковых лепестков.
6. Сформулированы основные результаты и предложены варианты практического использования сфокусированных антенн в технических задачах.

СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

- Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ
1. *Лучкин С.А., Низамутдинов Р.Р.* Снижение уровней боковых лепестков сфокусированных антенных решеток // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 5. С. 33 - 35.
 2. *Низамутдинов Р.Р., Потапова О.В., Седельников Ю.Е.* Фокусирующие свойства пространственно-распределенных источников волновых полей в средах с потерями // Журнал «Нелинейный мир» 2010. №5. С. 310-315.
- Другие издания
3. *Низамутдинов Р.Р.* Сканирующие линейные сфокусированные антенны Тезисы докладов Международная молодежная научная конференция XVIII Туполевские чтения - Казань, 28-29 Мая 2010
 4. *Низамутдинов Р.Р.* Оптимизация антенн наземных средств связи с БПЛА с использованием принципа сфокусированных апертур // Тезисы докладов Международная молодежная научная конференция XVI Туполевские чтения - Казань, 28-29 Мая 2008
 5. *Низамутдинов Р.Р.* Optimization of ground based antennas of communication with UAV (unmanned aerial vehicle) using focused apertures technique // Тезисы докладов Всероссийской студенческой научной конференции «Молодежь, общество, современная наука, техника и инновации» - Красноярск, 2008
 6. *Низамутдинов Р.Р.* Об оптимальном амплитудном распределении антенны сфокусированной в зоне Френеля // Тезисы докладов Девятой Международной научно-технической конференции "Проблемы техники и технологий телекоммуникаций" - Казань, 25-27 Ноября 2008
 7. *Лучкин С.А., Потапова О.В., Низамутдинов Р.Р., Седельников Ю.Е.* Эффективные алгоритмы обработки сигналов в эхолокационных устройствах с многоэлементной синтезированной апертурой // Материалы докладов Международной НТК «Не разрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». М.: РОНКТД, 2007.
 8. *Лучкин С.А., Низамутдинов Р.Р.* Снижение влияния побочных всплесков при применении разреженных апертур сфокусированных в зоне Френеля // Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» - Казань, 2007.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ.л.1,0. Усл.печ.л. 0,93. Уч. изд. л. 0,97.
Тираж 100. Заказ 03,

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К. Маркса, 10

10 z