

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ПРИЛЕПСКИЙ Евгений Дмитриевич



ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ
СИСТЕМ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ
СЛУЧАЙНЫХ И РЕГУЛЯРНЫХ
ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

01.04.03—радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Харьков—1993

Работа выполнена в Харьковском высшем военном авиационном училище радиозлектроники.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Горобец Николай Николаевич (ХГУ, г. Харьков);

доктор технических наук, профессор **Шифрин Яков Соломонович** (ХИРЭ, г. Харьков);

доктор физико-математических наук, профессор
Яковлев Виталий Павлович (ГАНГ, г. Москва).

Ведущая организация — НИИ «Орион» (г. Киев).

Защита состоится « 4 » июня 1993 г. в 14 часов

на заседании специализированного совета Д 053 06 04 Харьковского госуниверситета (310077, г. Харьков, 77, пл. Свободы, 4, ауд. Ш-9).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан « 21 » *апреля* 1993 г.

Ученый секретарь

специализированного совета


ЧЕБОТАРЕВ В. И.

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00814211 (H)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Фурье-оптика (или радиооптика) — это научное направление, в котором радиобезические методы используются для решения задач пространственной фильтрации, т.е. задач преобразования пространственной структуры электромагнитных полей.

Одним из важных современных технических достижений является разработка когерентно-оптических и голографических методов, основанных на выполнении различных операций с амплитудой электромагнитной волны, т.е. с комплексными величинами. Несмотря на большое количество ключевых проблем, решенных когерентно-оптическими методами, широкому практическому применению этих методов пространственной фильтрации препятствует их высокая чувствительность к фазовым искажениям, характерным для них, когерентные шумы и необходимость точных встировок. Поэтому остаются актуальными исследования некогерентно-оптических систем пространственной фильтрации, в которых преобразуется интенсивность электромагнитных полей, т.е. вещественная неотрицательная величина. Некогерентно-оптические системы устойчивы к шумам, типичным для когерентных систем, фазовый шум становится несущественным, что позволяет использовать диффузно отражающие или самосветящиеся объекты, снижаются требования к точности встировки. Однако проблемы расширения функциональных возможностей некогерентно-оптических систем и методов обработки полей требуют дальнейшего исследования. В широком круге относящихся сюда конкретных задач выделили два ключевых направления.

Первое связано с использованием принципа псевдокогерентной пространственной фильтрации в некогерентно-оптических сис-

темах, позволяющего получить импульсный отклик (функцию рассеяния точки) с того вида и выполнять такие линейные преобразования, как обратную свертку, фильтрацию, дифференцирование и другие. При этом возникает необходимость синтеза требуемого импульсного отклика некогерентно-оптической системы путем введения в ее зрачке определенных искажений волнового фронта. Эта задача не имеет единственного решения. Поэтому значительный интерес представляет проблема синтеза физически реализуемого импульсного (или частотного) отклика некогерентно-оптической системы, когда неоднозначность решения используется для улучшения характеристик системы, например, увеличения отношения сигнал/шум.

Второй круг задач связан с оптимальным синтезом импульсного и частотного откликов некогерентной системы. Анализ многообразных ситуаций, возникающих в практических задачах пространственной фильтрации полей некогерентно-оптическими системами, показывает, что форма импульсного и частотного откликов может не предпретаться заранее, а получаться в результате решения соответствующей задачи оптимизации параметров системы. При этом появляется возможность нахождения предельно достижимых величин параметров физически реализуемых некогерентно-оптических систем, что важно для их оптимального конструирования.

Отметим, что методы пространственной фильтрации нашли широкое распространение в системах сбора и обработки информации не только в оптическом, но и других диапазонах электромагнитных волн. В настоящее время функции электродинамических излучающих систем как устройства преобразования полей существенно усложнились и расширились. Это требует оптимального проектирования

излучающих систем и определения их потенциальных возможностей. В этом плане задачи оптимального синтеза оптических систем родственны задачам оптимального синтеза электродинамических излучающих систем и должны рассматриваться с единых позиций.

Таким образом, несомненно актуальной является тема диссертации: разработка совокупности методов синтеза систем пространственной фильтрации случайных и регулярных волновых полей на основе последовательного применения радиофизических принципов с учетом условий физической реализуемости.

Цель работы состоит в разработке совокупности физически реализуемых методов синтеза систем пространственной фильтрации, направленных на расширение функциональных возможностей некогерентно-оптических и электродинамических излучающих систем и определение фундаментальных пределов характеристик фильтров в пространственной и пространственно-частотных областях.

Методы исследования — математическое моделирование с последующим использованием методов решения некорректных обратных задач, элементов функционального анализа, вариационного исчисления и теории интегральных уравнений. Полученные в работе уравнения решаются как аналитическими методами, так и с использованием ЭВМ.

Научная новизна работы. В результате проведенных комплексных исследований систем пространственной фильтрации случайных и регулярных волновых полей с учетом условий физической реализуемости впервые:

— поставлена и решена задача оптимального синтеза, в которой форма импульсного отклика системы получается в результате максимизации параметра, связанного с импульсным откликом, путем

- целенаправленного изменения формы границы и согласованной с ней функции пропускания зрачка оптической системы;
- предложена постановка задачи оптимального синтеза физически реализуемых некогерентных систем, решение которой принадлежит классу бинарнофазовых (принимающих два значения фазы 0 и π) или амплитудных функций пропускания зрачка, что значительно упрощает их техническую реализацию;
 - исследованы возможности управления распределением интенсивности поля в пространственной области вблизи точки геометрического фокуса путем скатия или растяжения фокального пятна вдоль оптической оси;
 - проведен последовательный анализ предельных возможностей пространственной фильтрации некогерентных полей физически реализуемыми пассивными оптическими системами. Для наиболее распространенной круглой формы зрачка достигнуто увеличение частотного отклика на высоких пространственных частотах в 3,8 раза. Получены зависимости предельного частотного отклика от полного светового потока, прошедшего через систему, что дает возможность выбора приемлемого компромисса между этими величинами в конкретных ситуациях;
 - предложены новые алгоритмы синтеза функции зрачка, максимизирующей частотный отклик пассивной некогерентной системы в полосе частот, а в наиболее интересном для практики случае высоких пространственных частот получено аналитическое решение задачи. Показано, что в предельном случае, когда величина среднего частотного отклика в полосе частот достигает максимума, просветленная область зрачка стягивается в отрезки и полное свето-

пропускание равно нулю, следовательно, любое сколь угодно малое полное светопропускание приводит к нарушению условия физической реализуемости оптической системы;

- показано, что применение метода псевдокогерентной пространственной фильтрации позволяет эффективно увеличивать частотный отклик некогерентной системы в области средних и высоких пространственных частот с одновременным подавлением постоянной составляющей и улучшением отношения сигнал/шум;

- предложены аппроксимационные алгоритмы синтеза частотных характеристик общего вида при псевдокогерентной фильтрации с улучшенным отношением сигнал/шум. Получены условия, которым должны удовлетворять аппроксимируемые реализуемые частотные характеристики;

- исследован вопрос об эффективной компенсации aberrаций общего вида квазиоптимальными бинарнофазовыми и амплитудными фильтрами, делающими систему многофокусной;

- проведен последовательный анализ влияния различных локальных и интегральных ограничений, накладываемых на токовое распределение и диаграмму направленности электродинамической излучающей системы при определении предельных значений коэффициента концентрации мощности излучения и коэффициента направленного действия;

- предложена новая процедура определения оптимального времени синтеза апертуры в условиях неустранимых фазовых флуктуаций.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов и выводов основана на их подтверждении экспериментальными ре-

результатами, полученными в работах других авторов; использовании широко распространенных моделей, учитывающих основные процессы, происходящие в некогерентных оптических и электродинамических излучающих системах; применении адекватного математического аппарата.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная совокупность методов синтеза систем пространственной фильтрации случайных и регулярных полей расширяет их функциональные возможности. Методы оптимального синтеза частотного отклика при псевдокогерентной фильтрации расширяют спектр операций, проводимых над некогерентными волновыми полями и могут конкурировать с когерентными методами в ряде практических случаев (например там, где неустранимы вибрации). Оптимальные функции зрачка могут найти практическое применение в оптических сканирующих системах, сочетающих большую скорость отклонения луча с высокой разрешающей способностью. Применение фильтров, компенсирующих aberrации, позволяет обрабатывать и сравнивать изображения объектов, находящихся на различных расстояниях. Синтезированные фильтры-компенсаторы aberrаций позволяют улучшить характеристики СВЧ-объективов, используемых в плазменной диагностике, атмосферных исследованиях, радиометрии и радиолокации дальнего инфракрасного и миллиметрового диапазонов. Практическую ценность для электродинамических систем с повышенной помехозащищенностью и систем передачи энергии СВЧ-пучком имеют результаты оптимального формирования диаграммы направленности с максимально плоским либо с максимально узким главным лепестком и полученные фундаментальные пределы пространственной концентрации энергии.

гии электродинамическими излучающими системами ограниченных размеров при наличии фазовых и амплитудных искажений токового распределения. Все эти результаты имеют прикладную направленность и представляют практический интерес.

Реализация результатов на практике. Результаты настоящего исследования использованы для решения практических вопросов, связанных с созданием ряда конкретных радиотехнических комплексов в ГНИЦСР "Айсберг" (г. Киев), в/ч 44386, а также в учебном процессе ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, ХВВИАУ РВ им. маршала Н.И. Крылова.

Апробации работы. Результаты работы докладывались на: X Всесоюзной научно-технической конференции "Высокоскоростная фотография и метрология быстропротекающих процессов" (Москва, 1981); XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции "Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы" (Ереван, 1982); I Всесоюзной конференции "Оптическое изображение и регистрирующие среды" (Ленинград, 1982); XI Всесоюзной научно-технической конференции "Высокоскоростная фотография и метрология быстропротекающих процессов" (Москва, 1983).

Публикации. Основные научные результаты и выводы диссертации отражены в 28 публикациях. Во всех работах, выполненных в соавторстве, автору диссертации принадлежит постановка задачи и разработка метода ее решения. Конкретные расчеты и обсуждение результатов проведены совместно М.Я. Минцем и Б.М. Мичковичем.

На защиту выносятся:

Основные положения диссертации.

I. Развитая теория оптимального синтеза физически реализуемых

некогерентных и псевдокогерентных оптических систем, позволяющая расширить их функциональные возможности.

2. Развита теория оптимального синтеза применена к электродинамическим излучающим системам.

Основные результаты, выводы и рекомендации.

- Получены интегральные уравнения, решение которых позволяет определить функцию пропускания и форму зрачка оптической системы;
- Исследованы оптимальные функции зрачка, удовлетворяющие условиям физической реализуемости;
- Поставлена и решена задача синтеза фокусирующей оптической системы, обеспечивающей требуемое распределение интенсивности поля в области вблизи геометрического фокуса;
- Разработаны методы пространственной фильтрации некогерентных полей, позволяющие увеличить частотный отклик системы в заданной области пространственных частот;
- На основе развитой теории оптимального синтеза частотного отклика установлены потенциалы и возможности фильтрации некогерентными и псевдокогерентными системами с учетом физической реализуемости;
- Предложен метод оптимального аппроксимационного синтеза частотного отклика общего вида при псевдокогерентной фильтрации некогерентных полей и определен физически реализуемый тип частотного отклика;
- Решена задача компенсации аберраций, характерных для оптических систем различного назначения;
- Рассмотрены новые задачи синтеза, в которых в явном виде учитываются локальные и интегральные ограничения, накладывае-

мые на диаграмму направленности или токовое распределение, что позволяет находить предельно достижимые значения характеристик полей излучения и габаритов излучающих систем;

- При синтезе излучающих систем с максимальным коэффициентом направленного действия выбор ограничений, накладываемых на токовое распределение, обеспечивает слабовыраженную сверхнаправленность;

- Исследовано влияние амплитудных и случайных фазовых искажений поля в апертуре на характеристики синтезированных излучающих систем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 139 наименований и приложения. Объем работы - 271 страница. Основная часть содержит 218 страниц машинописного текста, 72 рисунка, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемых в работе проблем, дан краткий обзор известных результатов, сформулирована цель исследования, кратко изложено содержание диссертации, полученные в ней результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В главе I (Основы теории синтеза систем пространственной фильтрации слуховых и регулярных волновых полей с учетом условий физической реализуемости), изложена общая постановка задачи синтеза оптических и электродинамических систем пространственной фильтрации пространственно-некогерентных и пространственно-когерентных волновых полей. В п.1.1 и п.1.2. рассматривает-

ся класс некогерентных изопланарных оптических систем, для которых дифракционный процесс формирования изображения описывается сверткой интенсивностей. Привлекательность некогерентной системы в том, что она характеризуется избыточной, многоканальной природой, что делает ее устойчивой к шумам, типичным для когерентной системы, нечувствительна к фазовым характеристикам объектов, в ней ниже требования к точности установки апертурных диафрагм, наконец, теория некогерентной системы оперирует экспериментально измеряемыми величинами — интенсивностями.

В то же время возможности выполнения пространственной фильтрации в некогерентных системах ограничены тем, что импульсный отклик или функция рассеяния точки таких систем является действительной неотрицательной функцией, а частотная характеристика или оптическая передаточная функция определяется как автокорреляция зрачка и, следовательно, модуль частотной характеристики имеет максимум на нулевой пространственной частоте, а его значение на любой пространственной частоте, не равной нулю, меньше этой максимальной величины. Общий подход к задаче синтеза частотных характеристик общего вида в некогерентной системе основан на принципе псевдокогерентного преобразования, предусматривающего разделение биполярного импульсного отклика на положительную и отрицательную (по модулю) части, свертку входного изображения с этими двумя положительными импульсными откликами и вычитание полученных изображений.

Задача заключается в синтезе заданных импульсных откликов в виде функции рассеяния точки некогерентной системы путем введения в ее зрачке определенных амплитудно-фазовых искажений вол-

нового фронта. Поскольку заданные функции рассеяния точки имеют разрывы производной, то задача синтеза сводится к аппроксимации заданной амплитудной функции рассеяния точки $E^0(\vec{z})$ с помощью физически реализуемой амплитудной функции рассеяния точки $E(\vec{z})$ оптической системы со зрачком конечных размеров.

Точность аппроксимации контролируется средним квадратичным отклонением $\varepsilon = \left[\int_{\vec{z}} |E^0(\vec{z})|^2 d\vec{z} \right]^{-1} \left[\int_{\vec{z}} |E(\vec{z}) - E^0(\vec{z})|^2 d\vec{z} \right]$.

Задача аппроксимации заданной амплитудной функции рассеяния сводится при этом к отысканию функции зрачка, обеспечивающей наименьшее значение ε , т.е. к отысканию $\text{Inf} \varepsilon$ в классе допустимых функций зрачка $\{P(\vec{\omega})\}$, где $\vec{\omega}$ - пространственная частота. Поскольку величина ошибки ε является монотонно убывающей функцией размеров зрачка оптической системы, то решение поставленной задачи определяет та же функцию зрачка, обеспечивающую минимальные размеры зрачка при заданной точности аппроксимации (п.3.5 и п. 3.6).

Разработка оптической системы обязательно включает оценку ее качества. При оценке оптических систем тот большой объем информации, который заключают в себе функции рассеяния точки и оптическая передаточная функция, будет в некотором роде помехой и необходимо ввести критерии качества, вычисляемые с помощью функции рассеяния точки и оптической передаточной функции. Числовые критерии качества, получаемые на основе функции рассеяния точки, могут быть представлены в обобщенном виде

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\infty} g(\vec{z}) w(\vec{z}) d\vec{z}, \quad (1)$$

где $g(\vec{z})$ - функция рассеяния точки, $w(\vec{z})$ - заданная весовая функция, учитывающая требования, предъявляемые к функции рассе-

яния точки. Обобщенная числовая оценка $\Gamma(I)$ с помощью функции $f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\vec{z}) \exp(-i\vec{\omega}\vec{z}) d\vec{z}$ может быть представлена (с точностью до постоянного множителя) в виде

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\infty} \tau(\vec{\omega}) f(\vec{\omega}) d\vec{\omega}, \quad (2)$$

где $\tau(\vec{\omega})$ - оптическая передаточная функция. Дуальность величины Γ позволяет с елиных позиций рассматривать оценку качества оптической системы в пространственной (\vec{z}) и пространственно-частотной ($\vec{\omega}$) областях и поставить задачу определения функции зрачка, которая при заданных габаритах зрачка и заданной весовой функции $w(\vec{z})$ (или $f(\vec{\omega})$) обеспечивала бы наибольшее значение величины Γ , т.е. $\text{Sup } \Gamma$ в классе допустимых функций зрачка $\{P(\vec{\omega})\}$. Исследованию этой задачи посвящены главы 2 и 3. Отметим, что величина Γ есть монотонно растущая функция размеров зрачка и поэтому решение поставленной выше задачи одновременно дает решение задачи об отыскании такой функции зрачка, которая при заданной величине оценки качества оптической системы Γ обеспечивает минимальные размеры зрачка.

Класс функций зрачка $\{P(\vec{\omega})\}$ не может быть абсолютно произвольным. Для физически реализуемых, пассивных (т.е. без усиления светового потока) оптических систем функция зрачка ограничена условием

$$|P(\vec{\omega})| \leq 1. \quad (3)$$

Условие (3) означает, что любое изменение функции зрачка, связанное с решением поставленных выше задач, приводит к его затенению, так что световой поток, прошедший через зрачок, оказывается меньше, чем для чистого зрачка. Чтобы иметь возможность

контролировать световые потери, вызванные изменением функции зрачка, на нее следует наложить условие, фиксирующее световой поток через зрачок:

$$\int |\rho(\vec{\omega})|^2 d\vec{\omega} = E = \text{const} . \quad (4)$$

Локальное условие (3) является, вообще говоря, более жестким, чем интегральное условие (4). Только при достаточно малых значениях E , меньших предельного значения E_0 (значение E_0 определяется из условия: $\max |\rho(\vec{\omega})| = 1$), условие (3) есть следствие условия (4). В известных работах, посвященных синтезу некогерентных оптических систем, условие (4) является единственным ограничением, налагаемым на функцию зрачка, а получаемые функции зрачка могут приводить к недопустимо большим потерям световой энергии. Кроме того, что принципиально важно, при $E < E_0$ задача определения оптимальной функции зрачка оказывается линейной, а при $E \geq E_0$, когда "срабатывает" условие (3), задача определения оптимальной функции зрачка становится существенно нелинейной и нуждается в отдельном изучении, чему посвящены главы 2, 3 и 4.

В п. 1.3 предложен метод синтеза фильтров, компенсирующих aberrации и относящихся к классу бинарных фазовых, у которых фаза принимает значения 0 и π , или амплитудных. Задача сводится к определению функции пропускания фильтра, которая при заданной волновой aberrации доставляет наибольшее значение числовой оценке $\Gamma(I)$ в классе функций пропускания фильтра, удовлетворяющих условиям (3) и (4). Весовая функция $w(\vec{r}) = \delta(\vec{r})$ и числовая оценка Γ соответствует числу Штреля.

В п. 1.4 сформулированы задачи синтеза электродинамических

излучающих систем, родственные задачам оптимизации оптической системы по обобщенному числовому критерию $\Gamma(I)$. В качестве целевого функционала рассмотрен коэффициент концентрации мощности излучения и коэффициент направленного действия излучающих систем с непрерывным или дискретным раскрывом. Учет условий физической реализуемости производится путем наложения на диаграмму направленности и токовое распределение различных локальных и интегральных ограничений, в частности, типа (3) и (4). Решение поставленных задач проводится в главе 5.

В главе 2 (вариационные методы определения оптимальной функции зрачка) разбит метод синтеза импульсного отклика оптической системы при максимизации функционала $\Gamma(I)$ в пространственной области при условиях (3) и (4). В п.2.1 доказано существование решения задачи, для определения которого при условии (4), т.е. при $E < E_0$, может быть использован метод Эйлера-Лагранжа, а при $E > E_0$, когда "срабатывает" условие пассивности оптической системы (3), необходима модификация метода Эйлера-Лагранжа. В последнем случае ($E > E_0$) задача определения оптимальной функции зрачка сводится к решению существенно нелинейных интегральных уравнений. В п. 2.2 показано, что при $E < E_0$ оптимальная функция зрачка с точностью до постоянного множителя совпадает с собственной функцией линейного интегрального уравнения, соответствующей наибольшему собственному числу. Если допустима вариация формы зрачка, то оптимальная его форма получается из условия $|P(\vec{\omega})| = const$ на границе зрачка. В п.2.3 получены нелинейные интегральные уравнения для оптимальной функции зрачка при $E > E_0$, в частности, для бинарно-

параметр $\gamma = 1$ для недеформированного фокального пятна, что соответствует функции зрачка $P(\rho) = 1$. В главе 2 приведены графики различных оптимальных функций зрачка, полученных с учетом условия физической реализуемости (3).

В главе 3 (Вариационные методы синтеза некогерентной оптической системы (область пространственных частот)) излагается метод синтеза частотного отклика общего вида в некогерентной системе на принципе псевдокогерентной фильтрации и определены фундаментальные пределы пространственной фильтрации с учетом условий физической реализуемости (3), (4). Базовое нелинейное интегральное уравнение для определения оптимальных функций зрачка относится к типу уравнения (5) с ядром, совпадающим с весовой функцией $f(\vec{\omega})$ в обобщенной числовой оценке $\Gamma(2)$. Для некогерентной оптической системы в ее обычной форме в п. 3.1, 3.2, 3.3 рассмотрены задачи максимизации частотного отклика на фиксированной пространственной частоте и в заданной полосе частот, что соответствует весовым функциям вида:

$$\begin{aligned}
 f_1(\vec{\omega}) &= [\delta(\omega_x - \omega_0) + \delta(\omega_x + \omega_0)] \delta(\omega_y); \\
 f_2(\vec{\omega}) &= f(\omega_x) = 1, \quad \omega_0 \leq |\omega_x| \leq \omega_m; \\
 f_3(\vec{\omega}) &= f(\omega_x) = 0, \quad |\omega_x| < \omega_1, \quad |\omega_x| > \omega_m; \\
 f_4(\vec{\omega}) &= \delta(|\vec{\omega}| - \omega_0); \\
 f_5(\vec{\omega}) &= 1, \quad \omega_1 \leq |\vec{\omega}| \leq \omega_2; \\
 f_6(\vec{\omega}) &= 0, \quad |\vec{\omega}| < \omega_1, \quad |\vec{\omega}| > \omega_2,
 \end{aligned}$$

где $(\omega_0, \omega_m, \omega_1, \omega_2)$ - заданные величины, определяющие области на плоскости пространственной частоты $\vec{\omega}$. В случае весовых функций $f_1(\vec{\omega})$ и $f_2(\vec{\omega})$ получены аналитические выражения для оптимальных функций целевого и круглого зрачков

и числовой оценки $\Gamma(2)$. На рис. 2 для иллюстрации приведены зависимости максимального контраста $R = \Gamma E^{-1}$ оптической системы с круглым зрачком от величины полного светопропускания E при различных ω_0 в функции $f_1(\bar{\omega})$. Участок "плато" на рис. 2 соответствует случаю $E < E_0$, когда условие пассивности (3) выполняется автоматически.

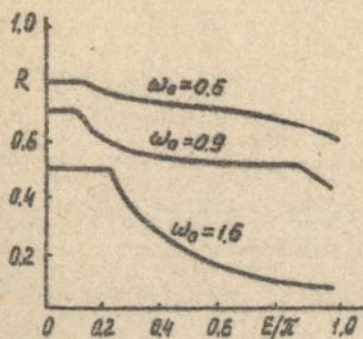


Рис. 2. Зависимость максимального контраста R на фиксированной частоте ω_0 от величины E при $f_1(\bar{\omega}) = f_1(\bar{\omega})$

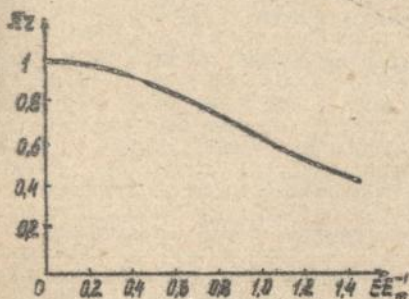


Рис. 3. Зависимость максимального контраста в полосе частот γ от величины E/E_m^{-1} при $f_2(\bar{\omega}) = f_2(\bar{\omega})$

На рис. 3 показана зависимость максимального контраста в полосе частот (весовая функция $f_2(\bar{\omega})$) $\gamma = \Gamma E^{-1} (\omega_m - \omega_0)^{-1}$ от величины отношения E/E_m^{-1} где $\omega_0 \approx 2^{-1} \omega_m$, ω_m — граничная частота, $E_m = 2 [\arccos \cos(2^{-1} \omega_0) - \omega_0 (1 - 4^{-1} \omega_0^2)^{1/2}]$. Из рис. 3 следует, что величина γ достигает максимального возможного значения $\gamma = \pi^{-1}$ при $E=0$ и любое сколь угодно малое значение E при $\gamma = \pi^{-1}$ приводит к нарушению условия пассивности (3). Т. о., оптимальная функция зрачка, полученная без учета пассивности оптической системы, физически нереализуе-

ма. Анализ результатов максимизации частотного отклика на фиксированной частоте и в полосе частот показывает, что наибольший эффект может быть получен в области высоких частот, близких к граничной частоте ω_H . Синтез в двузрачковой некогерентной системе частотного отклика общего вида рассматривается в п.3.4, 3.5, и 3.6. Поскольку задача аппроксимации частотного отклика имеет не единственное решение, то проведен анализ ошибки аппроксимации и получены альтернативные решения. Показано, что для наиболее распространенной круглой формы зрачка в двузрачковой системе могут быть синтезированы частотные отклики, для которых функция рассеяния точки $g(z)$ убывает при $z \rightarrow \infty$ быстрее, чем $z^{-3/2}$. При полосовой фильтрации погрешность аппроксимации не зависит от формы частотного отклика, а для увеличения амплитуды полезного сигнала выгодно брать возможно большее значение частоты, на которой происходит фильтрация.

В главе 4 (Синтез оптимальных фильтров компенсирующих ошибки функции зрачка) поставлена и решена задача синтеза оптимальных фильтров, компенсирующих аберрации общего вида. Для обращения волновой аберрации необходим комплексный фильтр, практическая реализация которого достаточно сложна. Поэтому значительный интерес представляют биарнофазовые (фаза принимает значения 0 и π) и амплитудные фильтры. В п.4.1 поставлена и решена задача максимизации числа Штреля (числовая оценка качества оптической системы, чувствительная к волновой аберрации) при условиях (3) и (4) в классе биарнофазовых функций. Уравнение для оптимальной функции пропускания фильтра имеет вид (5) с выделенным ядром $K(\vec{\omega}, \vec{\omega}')$, а его решение выража-

ется через собственную функцию ядра. В п. 4.2 получено решение той же задачи в классе амплитудных фильтров, которое выражается через собственную функцию ядра $K(\vec{\omega}, \vec{\omega}')$. Эффективность полученных фильтров исследована на примере компенсации сферической aberrации. При этом введение оптимального фильтра приводит к образованию двух фокусов, что может быть использовано для получения качественного изображения одновременной фокусировкой на двух объектах, находящихся на различных расстояниях. Кроме того, предлагаемые фильтры могут найти применение в тех диапазонах электромагнитных волн, где существуют ограниченные возможности изготовления хороших объективов.

В главе 5 (Задачи оптимального синтеза антенн, родственные задачам синтеза оптических систем) методы оптимального синтеза импульсного отклика оптической системы применены к задачам теоретического синтеза дискретных и непрерывных излучающих электродинамических систем. В п. 5.1 рассмотрена задача максимизации коэффициента мощности излучения электродинамических излучающих систем в классе диаграмм направленности с максимально плоским главным лепестком, для которых обращается в нуль первые $2M$ производные в направлении максимума излучения. Показано, что для симметричной линейной антенны-решетки изотропных излучателей оптимальное токовое распределение выражается через ортогональные полиномы дискретного переменного, связанные с полиномами Чебышева дискретного переменного. В случае непрерывной антенны с линейным и круглым раскрытием оптимальное токовое распределение выражается через полиномы Лежандра. Выяснено, в какой степени максимально плоские диаграммы допускают увеличение

крутизны среза главного лепестка. Задача максимизации коэффициента концентрации рассмотрена применительно к разностным диаграммам круглого раскрыва и получены квазиоптимальные токовые распределения. В ряде случаев токовое распределение необходимо подчинить локальному ограничению амплитуды (например, для удовлетворения требований электрической прочности), возникающая при этом нелинейная задача оптимального синтеза рассмотрена в п.5.2. Решение задачи получено методом последовательных приближений, быстрая сходимость которого подтверждена численными примерами. В п.5.3 предложен метод синтеза линейных непрерывных и дискретных электродинамических систем с максимальным коэффициентом направленного действия при слабой сверхнаправленности за счет ограничений амплитуды и оспилляций токового распределения. Оптимальные токовые распределения принадлежат классу равноволновых бинарнофазовых, что позволяет упростить схему питания. В п.5.3.1 исследован вопрос о максимизации коэффициента направленного действия в пределах заданной угловой рабочей зоны, где получены аналитические выражения для токовых распределений в круглом раскрыве, создающем диаграмму направленности минимаксного типа. Влияние возможных на практике регулярных амплитудных искажений (например, затенение части раскрыва) оптимального токового распределения исследовано в п.5.4. Влияние фазовых флуктуаций в антенне с синтезированной апертурой рассмотрены в п.5.5 аналитическими методами и получены асимптотические выражения для оптимального времени синтеза.

Основной текст дополнен Приложением, в котором поставлена

и решена задача оптимизации когерентной оптической системы для улучшения изображения протяженных объектов путем управления распределением интенсивности излучения в области перехода от света к тени, которая фактически определяет контраст изображения. Задача решена в классе функций зрачка, обеспечивающих неотрицательность функции рассеяния линии и в более широком классе функций зрачка.

В заключении перечислены основные результаты развитой теории оптимального синтеза как некогерентных оптических систем, так и электродинамических излучающих систем, позволяющие решить ряд важных задач.

1. Разработанные методы пространственной фильтрации некогерентных полей позволяют увеличить величину частотного отклика системы в области высоких пространственных частот, которые в неоптимизированной системе оказываются подавленными.

2. Оптимальные функции зрачка применимы к сканирующим системам, которые имеют тот же тип частотной характеристики, что и некогерентные системы.

3. Методы получения максимального частотного отклика применены к системам псевдокогерентной фильтрации, это позволяет увеличить частотный отклик на средних пространственных частотах, что принципиально недостижимо в некогерентных системах, построенных по обычной схеме.

4. Предложенный аппроксимативный метод синтеза частотного отклика общего вида позволяет получить на основе принципа псевдокогерентной фильтрации систему, сочетающую возможности когерентной системы с достоинствами некогерентной системы и име-

щую повышенное отношение сигнал/шум.

5. Введение целенаправленных искажений волнового фронта в зрачке оптической системы позволяет компенсировать aberrации общего вида и пригодит к синтезу многофокусной системы, что представляет практический интерес.

6. Возможности детектирования выходного сигнала улучшаются при концентрировании светового потока в заданную плоскую или пространственную области. Полученные оптимальные функции и формы зрачка пассивной оптической системы создают функции рассеяния точки с максимальной концентрацией энергии в указанных выше областях при заданной величине полного светопропускания.

7. Методы оптимального синтеза оптических систем могут быть перенесены на другие системы с подобными физическими моделями. Идеи, лежащие в основе метода оптимального синтеза оптических систем, могут найти широкое применение. Одно из таких применений - теория синтеза антенн. При этом появляется возможность рассмотреть новые задачи, учитывающие локальные ограничения, накладываемые на диаграмму направленности и токовое распределение.

8. В диссертации приведены решения задач оптимального синтеза токового распределения, создающего диаграмму направленности с максимальной концентрацией излучаемой мощности в заданный угловой сектор при максимально плоском главном максимуме, локальном ограничении амплитуды тока возбуждения и других ограничениях, отражающих реально существующие условия функционирования излучающих систем различного назначения. Оптимальная постановка задачи синтеза позволяет находить предельно достижимые

минимальные размеры излучающей системы при заданных значениях энергетических параметров. В этом смысле развитый метод конструктивен и плодотворен. Для антенн малых энергетических размеров развит метод синтеза систем с максимальными коэффициентами направленного действия при специальных требованиях к токовому распределению, обеспечивающий слабовыраженную сверхнаправленность.

9. Рассмотрены антенны с обработкой сигнала, для которых разработанный метод оптимального синтеза позволяет учесть влияние фазовых флуктуаций, возникающих при синтезировании апертуры антенны, на разрешение по азимуту и размер синтезированной апертуры.

Возможные применения и развитие предложенных методов оптимального синтеза систем сбора и обработки информации в различных диапазонах электромагнитных волн.

10. Обработка изображений характерна во всех диапазонах электромагнитных волн: радиолокация и радиометрия, классическая и адаптивная оптика, астрономия, оптическая и рентгеновская, рентгенография и малоугловое рентгеновское рассеяние, а также изображения акустических сигналов в гидролокации, ультразвуковое зондирование. Эти системы объединяет общее выражение для создаваемого ИЧ изображения.

Дискретизация выхода относится, видимо, к любым способам получения изображения (фотопленка, экран телевизора, матрица радиометров, фотодиодная матрица). При этом объект предполагается непрерывным. Отличие восстановленного объекта от истинного обусловлено двумя причинами. Первая связана с наличием поме-

хи в выходном сигнале, из-за чего в восстановленном объекте присутствует погрешность. Вторая причина не связана с помехой и возникает даже при ее полном отсутствии. Ее причина в деградации истинного объекта с бесконечным числом степеней свободы при его оценке выходом с конечным числом степеней свободы. При уменьшении шага дискретизации выходного сигнала увеличивается погрешность, связанная с помехой, и уменьшается погрешность из-за дискретизации выхода. Приемлемый компромисс между двумя составляющими погрешности восстановления объекта полностью определяет естественный параметр регуляризации - число отсчетов выхода.

Развитые в работе методы оптимального синтеза импульсного и частотного отклика органично входят в процедуру получения устойчивого решения интегрального уравнения первого рода. Устойчивость решения этого уравнения можно обеспечить, в принципе, не только на этапе математической инверсии, но и при регистрации сигнала. Для этого необходимо посредством оптимизации изменить соответствующим образом импульсный (частотный) отклик.

11. Реализация адаптивных методов формирования изображения с устранением искажений волнового фронта управляемых элементом оптической системы в ряде случаев затруднена из-за быстрых флуктуаций показателя преломления среды. Решение задачи синтеза оптимальной функции зрачка позволяет уменьшить влияние на качество изображения остаточных, некомпенсированных в реальном времени фазовых искажений светового поля.

12. Малоугловое рентгеновское (а также электронное или нейтронное) рассеяние обусловлено наличием в исследуемом объекте

пространственных неоднородностей, размеры которых велики по сравнению с длиной волны падающего излучения. Возникающие здесь задачи структурной интерпретации данных малоуглового рассеяния близки к задачам синтеза импульсного отклика общего вида при псевдокогерентной фильтрации и для решения их могут использоваться развитые в работе подходы.

13. Оптимальный синтез антенных систем, исследованный в работе, подразумевает, что форма диаграммы направленности не предreshается заранее, а получается в результате решения задачи синтеза. При такой постановке задачи точка наблюдения может находиться как в дальней зоне антенны, где сформировалась диаграмма направленности, так и в ближней зоне.

14. Для передачи энергии в настоящее время предлагается использовать СВЧ-пучок. Найденные в диссертации оптимальные токовые распределения позволяют без уменьшения мощности полезного сигнала в месте приема уменьшить мощность в месте передачи, что улучшит электромагнитную обстановку.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих изданиях:

1. Минкович Б.М., Прилепский Е.Д. Суммарные и разностные диаграммы направленности с минимальной мощностью бокового излучения //Радиотехника и электроника.-1970.-Т.15, №7.-С.1379-1384.
2. Прилепский Е.Д., Минкович Б.М. О выборе возбуждения и формы апертуры антенны при минимизации излучаемой мощности вне заданного телесного угла //Радиотехника и электроника.-1974.-Т.19, №4.-С.823-831.

3. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Максимизация мощности излучения линейной антенны в заданном угловом секторе при ограничении амплитуды тока // Радиотехника и электроника.-1974.-Т.19, №9.-С.1824-1831.
4. Прилепский Е.Д., Минкович Б.М. Минимизация мощности бокового излучения антенны с затененным центром раскрыва /В кн. Антенны/Под редакцией А.А.Пистолькорса.-М.:Связь,1974.-В.19.-С.17-28.
5. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Максимизация излучения антенной решетки в заданном угловом секторе при ограничении амплитуды токов возбуждения // Радиотехника и электроника.-1975.-Т.20, №3.-С.510-514.
6. Минкович Б.М., Прилепский Е.Д.О максимизации коэффициента направленного действия антенны в пределах угловой зоны эллиптической формы// Радиотехника.-1979.-Т.34, №11.-С.41-44.
7. Прилепский Е.Д., Минкович Б.М., Науменко С.В. Оптимальная аподизация посредством взаимосвязанного расчета функции и формы зрачка // Оптика и спектроскопия.-1979.-Т.47, В.6.-С.1186-1189.
8. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Аподизация пассивной осесимметричной^{ной} оптической системы // Оптика и спектроскопия.-1980.-Т.48, В.5.-С.992-997.
9. Прилепский Е.Д., Минц М.Я. Трехмерная задача аподизации осесимметричной безабберационной пассивной оптической системы // Оптика и спектроскопия.-1981.-Т.50, В.5.-С.977-986.
10. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Аподизация пассивной оптической системы с абберациями // Оптика и спектроскопия.-1982.-Т.52, В.5.-С.898-903.

11. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Аподизация пассивной когерентной оптической системы для улучшения изображения края полуплоскости // Оптика и спектроскопия. - 1982. - Т. 53, В. 3. - С. 529-534.
12. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Улучшение контраста изображения оптической системы с аберрациями с помощью аподизации // Оптика и спектроскопия. - т. 53, в. 5 - С. 893-899.
13. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Оптимизация частотного отклика оптической сканирующей системы // Оптика и спектроскопия. - 1983. - Т. 54, В. 4. - С. 718-724.
14. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Максимизация частотного отклика пассивной оптической системы в полосе частот // Оптика и спектроскопия. - 1983. - Т. 54, В. 6. - С. 1093-1098.
15. Минц М.Я., Прилепский Е.Д., Вячовский В.А. Оптимизация частотно-контрастной характеристики осесимметричной пассивной оптической системы без аберраций // Оптика и спектроскопия. - 1983. - Т. 55, В. 3. - С. 549-552.
16. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Оптимизация частотной характеристики некогерентной оптической системы в методике двухлучевого синтеза // Оптика и спектроскопия. - 1985, Т. 58, В. 4. - С. 884-888.
17. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Линейные антенные решетки с максимальным коэффициентом направленного действия при ограничении амплитуды тока // Радиотехника и электроника. - 1987. - Т. 32, № 6. - С. 1152-1166.
18. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Оптимизация коэффициента концентрации мощности излучения линейной антенны с максимально плоской диаграммой направленности // Радиотехника и

- электроника.-1987.-Т.32,№10.-С.2046-2051.
19. А.с.1364036 СССР,МКИ³ 02В 26/10.
Сканирующее оптическое устройство формирования изображения
/Прилепский Е.Д., Бледнов В.И..
20. Минц М.Я., Прилепский Е.Д., Заслонко В.М. Оптимизация коэффициента концентрации мощности излучения антенны с круглым раскрывом и максимально плоской диаграммой направленности //Радиотехника и электроника.-1988.-Т.33,№9.-С.1888-1894.
21. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Линейные антенны с максимальным коэффициентом направленного действия при ограничении амплитуды тока //Известия вузов. Сер. радиофизика.-1989.-Т.32, №8.-С.995-999.
22. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Немшилов Ю.А. Оптимальный синтез частотной характеристики двулучевой оптической системы //Оптика и спектроскопия.-1989.-Т.66,№2.-С.433-438.
23. Минц М.Я., Прилепский Е.Д., Заслонко В.М. Синтез диаграммы направленности линейной антенной решетки с максимально плоским главным лепестком // Радиотехника и электроника.-1990.-Т.35,№3-С.487-493.
24. Минц М.Я., Прилепский Е.Д. Оптимальный синтез узкополосной частотной характеристики двулучевой системы // Оптика и спектроскопия.-1991-Т.71,В.3.-С.532-538.

465163

AB 27.347
AB 27.347