

*На правах рукописи*



**Слободяненко Александр Александрович**

**Реконструкция электромагнитного поля антенн  
на основе измерений в ближней зоне**

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», (ТУСУР)

**Научный руководитель**

**Фатеев Алексей Викторович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектроники и систем связи ТУСУР

**Официальные оппоненты**

**Григорьев Андрей Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)), г. Санкт-Петербург;

**Лемберг Константин Вячеславович**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории приборостроения Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

**Ведущая организация**

Федеральное государственное унитарное предприятие «**Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений**», Московская область, г. Солнечногорск

Защита состоится «26» декабря 2023 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 40, 201 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/5oukuvtn>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноябрь 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 24.2.415.01

доктор физ.-мат. наук



А.Е. Мандель

## АВТОРЕФЕРАТ

### Актуальность темы

Современные измерительные комплексы, применяемые в области антенных измерений, позволяют определять и контролировать различные характеристики антенн, что способствует ускоренной разработке новых типов антенн, а также является неотъемлемой и критически важной частью их опытного и серийного производства. Наиболее широкий спектр определяемых характеристик излучения обеспечивают измерительно-вычислительные комплексы ближнего поля, основанные на получении информации об электромагнитном поле антенны в ближней зоне и ее последующем преобразовании в требуемые характеристики излучения. При этом от математической строгости формулировки задачи и обоснованности используемых методов зависит качество и достоверность определяемых характеристик.

По-прежнему остается актуальной задача сокращения времени проведения измерений, расширения функциональных возможностей существующих измерительно-вычислительных комплексов ближнего поля, а также повышения точности определения характеристик антенн. Решить эти задачи в рамках совершенствования классического метода модального разложения, основанного на разложении электромагнитного поля антенны по волновым функциям с коэффициентами, определяемыми из измерений ближнего поля с помощью преобразования Фурье, не представляется возможным из-за фундаментальных ограничений, а именно: необходимости канонических поверхностей зондирования при извлечении информации ближнего поля, ограничений на сектор достоверного определения диаграммы направленности, а также асимптотической связи между коэффициентами разложения и электромагнитным полем антенны. Это исключает возможность повышения точностных характеристик метода, а также возможность его использования для ряда задач, существующих в области антенных измерений. Поэтому необходимы альтернативные подходы, в рамках которых альтернативные методы и алгоритмы преобразования позволят преодолеть ограничения существующих методов.

Цель работы – разработать метод и методику, обеспечивающие решение задачи определения распределения электромагнитного поля антенны по измерениям поля в ближней зоне.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод решения обратной задачи излучения.
2. Разработать и реализовать методы уменьшения вычислительных затрат на решение обратной задачи излучения.

3. Исследовать разработанный метод на предмет предельных ограничений при решении задачи определения пространственного распределения электромагнитного поля антенны.
4. Разработать методику коррекции измеренного электромагнитного поля антенны в ближней зоне, учитывающую искажение электромагнитного поля, обусловленное влиянием датчика поля.
5. Провести экспериментальное исследование разработанных метода и методики.

Объектом исследования являются антенные измерительные комплексы ближней зоны с планарной схемой сканирования, предметом исследования – численные методы решения обратной задачи излучения.

Научная новизна (оригинальные результаты в соответствии с паспортом специальности 2.2.14 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии; п. 1 – решение внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и микроволновых устройств, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения):

1. Разработан метод решения обратной задачи излучения, обеспечивающий сходимость численного представления решения к точному решению, устойчивый к случайным погрешностям во входных данных.

2. Предложена методика коррекции измеренного распределения электромагнитного поля антенны в ближней зоне, отличающаяся использованием результатов электродинамического расчета калибровочной модели для компенсации влияния датчика поля.

3. Разработаны алгоритмы решения системы линейных алгебраических уравнений, обеспечивающие численное представление решения обратной задачи излучения и отличающиеся использованием проекций на гиперплоскости, образованные уравнениями системы.

Теоретическая значимость:

1. Продемонстрировано построение функционального базиса, обеспечивающего гладкость решения обратной задачи излучения, согласованную с функциональным пространством граничных значений решений уравнений Максвелла.

2. Для решения обратной задачи излучения разработаны и применены проекционные алгоритмы, основанные на процедуре Качмарца.

3. Доказано, что разработанный метод решения обратной задачи излучения обеспечивает сходимость решения как  $O(h^{3/2})$ .

4. Получена оценка оптимального уровня разбиения поверхности по критерию «точность-вычислительная сложность».

5. Статистически доказано, что разработанный метод решения обратной задачи излучения не имеет ограничений на структуру выборок электромагнитного поля в ближней зоне при их избыточности.

6. Определены соотношения, обеспечивающие оценку минимального числа выборок поля в ближней зоне антенны, обеспечивающих реконструкцию ее электромагнитного поля.

7. Показано, что методика коррекции, основанная на теории плоских волн, вносит методическую ошибку аддитивного характера.

#### Практическая значимость:

1. Разработанные метод и методика позволяет расширить возможности диагностики антенн, а также использовать эти данные для исследования взаимодействия электромагнитного поля антенны с прилежащими объектами, в т.ч. с обтекателями.

2. Разработанные проекционные алгоритмы могут применяться при решении задач обратного рассеяния и синтеза антенн и антенных решеток.

3. Выработаны практические рекомендации по выбору и построению калибровочных электродинамических моделей, необходимых для коррекции измерений электромагнитного поля антенн и антенных решеток в ближней зоне.

4. Разработанная методика коррекции измеренного электромагнитного поля антенны в ближней зоне может быть использована для устранения систематической ошибки системы датчиков поля.

Методология и методы исследования. При разработке методов использовались теория решения граничных задач электродинамики, теория операторов, теория проекторов. Для верификации, а также численного исследования разработанных алгоритмов применялись методы математической статистики и решения системы линейных алгебраических уравнений, а также современные системы электродинамического моделирования и численные методы электродинамики.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Проекционный метод решения обратной задачи излучения на основе информации о поле в ближней зоне антенны со случайной погрешностью не более минус 35 дБ обеспечивает восстановление электромагнитного поля на заданном расстоянии в передней полусфере эквивалентным уровнем помех не более минус 35 дБ.

2. Предложенная методика коррекции электромагнитного поля минимизирует систематическую погрешность измерений в ближней зоне, обусловленную влиянием

датчика поля, и позволяет получить данные ближнего поля антенны с погрешностью не более минус 40 дБ.

3. Разработанные алгоритмы последовательного и рандомизированного выбора проекции решения на гиперплоскости, реализованные в проекционном методе, позволяют уменьшить вычислительную сложность по памяти до  $O(N)$  по отношению к существующим, которые обеспечивают  $O(N^2)$ .

Достоверность результатов подтверждается качественным и количественным совпадением полученных результатов с результатами теоретических оценок, вычислительного эксперимента, а также результатами измерений.

#### Использование результатов исследования.

Разработанные метод решения обратной задачи излучения и методика коррекции измерений ближнего поля антенны внедрены в автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы ближнего поля АО "НИИЭП" и ООО НПК "ТЕСАРТ".

Публикации. Результаты исследования отражены в 9 публикациях, из которых 2 опубликованы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 4 входят в базу данных Scopus.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы представлялись и докладывались в материалах следующих симпозиумов и конференций:

1. International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), Tomsk, 2019.
2. Всероссийская науч.-техн. конференция, Наука. Промышленность. Оборона: Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г.
3. IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100<sup>th</sup> anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky: proc., Erlagol, 30 June – 4 July 2022.
4. IEEE 24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Erlagol, 29 June – 3 July 2023.
5. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023): proc., Divnomorskoe, 26-30 June 2023.

Личный вклад. Автору принадлежит ключевая роль в основных результатах работы. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии.

Благодарности. Автор глубоко благодарен научному руководителю Фатееву А.В., руководителю группы Ромодину В.Б., профессору Куксенко С.П. за полезное обсуждение результатов работы, и своим коллегам Шебалковой Л.В. и Герус Д.А. за предоставление возможности проведения экспериментов на автоматизированном комплексе контроля. Особую благодарность автор выражает Кулику В.С. за предоставленные данные

электродинамического моделирования антенн, а также помощь в проведении экспериментов.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят: введение, 5 разделов, заключение, список литературы из 118 источников и приложение. Объём диссертации с приложением составляет 113 с., в т.ч. 85 рис. и 2 табл.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследования. Сформулирована научная новизна, практическая значимость результатов работы, а также положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена аналитическому обзору. В частности, в подразделе 1.1 проводится обзор существующих методов и подходов в области антенных измерений, направленных на определение распределения электромагнитного поля антенн. При этом особое внимание уделяется подходу, основанному на преобразовании измеренных значений электромагнитного поля антенны ближней зоны в распределение электромагнитного поля в дальней зоне.

В подразделе 1.2 рассмотрены преимущества и недостатки классических преобразований, основанных на методе модального разложения, а также дан обзор методов реконструкции источников, обеспечивающих определение поля антенны в дальней зоне путем решения обратной задачи излучения. Отмечено, что метод реконструкции источников имеет большие функциональные возможности и является перспективным для решения задачи полного восстановления (реконструкции) электромагнитного поля антенны. Применяемые в настоящее время, в рамках метода реконструкции источников, подходы к устранению некорректности (по Адамару), недостаточно эффективны, что ограничивает их внедрение с существующие измерительно-вычислительные комплексы ближнего поля.

В подразделе 1.3 рассмотрены основные методы и методики коррекции измерений поля в ближней зоне, устраняющие систематическую составляющую ошибки, обусловленную влиянием датчиком поля (зонда). По результатам обзора в подразделе 1.4 сформулированы цель и задачи, а также способы их решения.

**Глава 2** посвящена разработке метода решения обратной задачи излучения, обеспечивающего сходимость численного представления решения к точному решению, устойчивую к случайным погрешностям во входных данных (измеренного электромагнитного поля антенны в ближней зоне). Для этого в подразделе 2.1 обратная задача излучения, представленная интегральным уравнением первого рода, формулируется,

в соответствии со структурой (схемой) измерений ближнего поля антенны (рисунок 1) в виде задачи определения распределения электрической  $\mathbf{J}$  и магнитной  $\mathbf{M}$  плотности тока на поверхности исследуемой антенны  $S$ , удовлетворяющих системе вариационных уравнений для всех значений поля, измеренного в точках  $\{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_m\}$

$$\begin{cases} \langle \mathbf{L}(\mathbf{J}, \mathbf{r}), \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{x} \rangle + \langle \mathbf{K}(\mathbf{M}, \mathbf{r}), \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{x} \rangle = \langle \mathbf{E}, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{x} \rangle \\ \langle \mathbf{L}(\mathbf{J}, \mathbf{r}), \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{y} \rangle + \langle \mathbf{K}(\mathbf{M}, \mathbf{r}), \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{y} \rangle = \langle \mathbf{E}, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{y} \rangle \end{cases} \quad (1)$$

где  $\langle \cdot, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \mathbf{x} \rangle$  – скалярное произведение, соответствующее воздействию идеального измерительного датчика поля (зонда) на компоненту напряженности электрического поля вдоль направления  $\mathbf{x}$ ;  $\mathbf{K}$  – магнитный интегральный оператор;  $\mathbf{L}$  – электрический интегральный оператор.

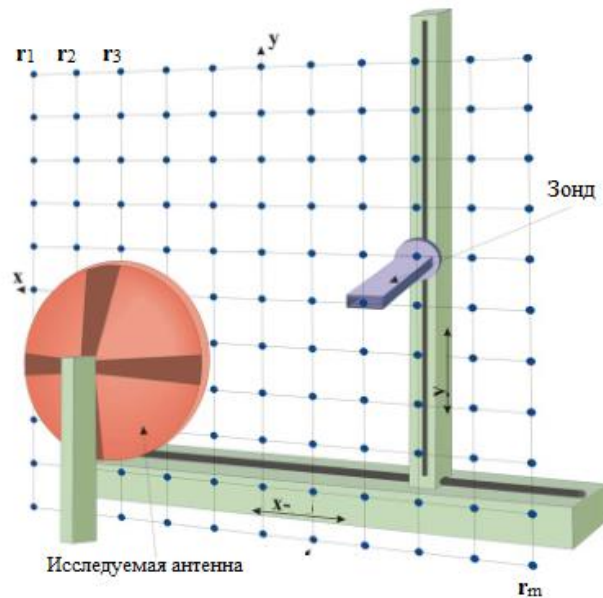


Рисунок 1 – Общая схема измерений электромагнитного поля антенны в ближней зоне

С целью обеспечения корректного решения сформулированной обратной задачи излучения (1) в подразделе 2.2 на основе исследования функциональных пространств решений уравнений Максвелла вводится дополнительная информация, выраженная в виде принадлежности решения  $\mathbf{J}, \mathbf{M}$  к пространству функций с непрерывной касательной дивергенцией  $H_{div}^{-1/2}(S)$ , в соответствии с которой определены базисные функции  $\{\Psi_n\}$  на треугольном разбиении  $T_h$  с максимальным линейным размером треугольника  $h$ . При этом линейная оболочка базисных функций  $\{\Psi_n\}$  образует конечномерное функциональное подпространство  $X_h \subset H_{div}^{-1/2}(S)$ , последовательность которых при  $h \rightarrow 0$  обеспечивает слабую сходимость решения обратной задачи

$$\min_{\mathbf{u}_n \in X_n} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_n\|_{H_{div}^{-1/2}(S)} \rightarrow 0, \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (2)$$



где  $\mathbf{u}$  - соответствует электрическому  $\mathbf{J}$  или магнитному току  $\mathbf{M}$ .

Конструктивное решение обратной задачи излучения (1), достигается решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), полученных подстановкой в (1) проекции решения  $\mathbf{J}, \mathbf{M}$  на базис  $\{\Psi_n\}$  конечномерного функционального пространства  $X_h$  в виде

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \alpha_n Z_{1n}^{elc} + \sum_{n=1}^N \beta_n Z_{1n}^{mag} = b_1 \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^N \alpha_n Z_{in}^{elc} + \sum_{n=1}^N \beta_n Z_{in}^{mag} = b_i, \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^N \alpha_n Z_{mn}^{elc} + \sum_{n=1}^N \beta_n Z_{mn}^{mag} = b_m \end{cases} \quad (3)$$

где  $Z_{in}^{elc} = \langle \mathbf{L}[\Psi_n], \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rangle$ ,  $Z_{in}^{mag} = \langle \mathbf{K}[\Psi_n], \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rangle$ ,  $b_i = \langle \mathbf{E}, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rangle$ ,  $\alpha_n$  – коэффициенты разложения  $\mathbf{J}$  по базису  $\{\Psi_n\}$ ,  $\beta_n$  – коэффициенты разложения  $\mathbf{M}$  по базису  $\{\Psi_n\}$ .

В подразделе 2.3 разрабатывается алгоритм решения (3), основанный на геометрической интерпретации СЛАУ вида

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y}, \quad (4)$$

согласно которой отдельное уравнение системы (4) определяет гиперплоскость в  $\square^n$

$$H_i = \{ \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \mid \sum_{j=1}^n x_j a_{ij} = y_i, \quad (i=1, 2, \dots, m) \}. \quad (5)$$

При этом, решение СЛАУ рассматривается как точка пересечения всех гиперплоскостей  $\mathbf{x} \in H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_m$ , для определения которой, на идеях Качмарца, разработан проекционный алгоритм, проявляющий асимптотическую сходимость в случае разрешимости СЛАУ (рисунок 2) и циклическую – в случае ее неразрешимости (рисунок 3).

Множественность решений неразрешимой СЛАУ устраняется за счет согласованности численного представления решения  $\mathbf{J}_n, \mathbf{M}_n \in X_n$  с исходным функциональным пространством  $H_{div}^{-1/2}(S)$ , при котором, согласно вариационному принципу, среди множества решений, минимизирующих среднеквадратичный функционал  $S_b = \left\{ \mathbf{u} : \inf_{\mathbf{x} \in \square^n} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2 = \|\mathbf{Au} - \mathbf{y}\|_2 \right\}$ , физически верному решению соответствует решение с минимальной нормой  $\min_{\mathbf{u} \in S_b} \|\bar{\mathbf{x}}\|_2$ . Для его определения разработан последовательный проекционный алгоритм решения обратной задач излучения, осуществляющий фильтрацию нуль пространства решений.

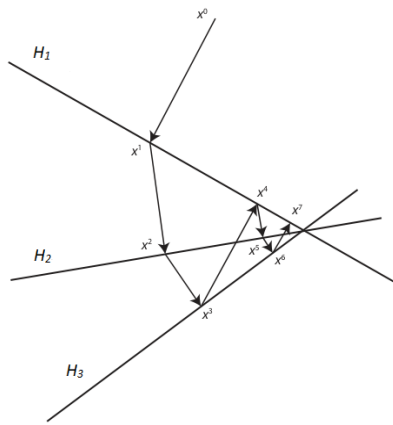


Рисунок 2 – Визуализация процедуры Качмарца для разрешимой СЛАУ

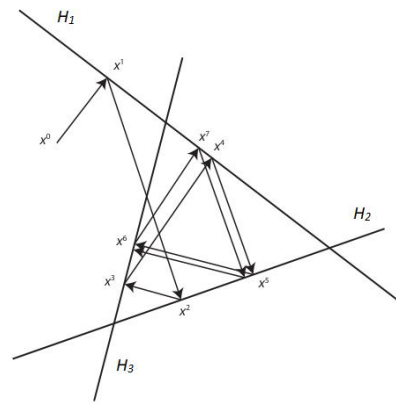


Рисунок 3 – Визуализация процедуры Качмарца для неразрешимой СЛАУ

### Последовательный проекционный алгоритм решения обратной задачи излучения

1. Выбрать начальное приближение решения  $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^n$
2. При  $\mathbf{y} = \mathbf{b}$   
Для  $k \geq 0$  выполнить
3. Для  $i=1 \dots m$
4.  $\mathbf{x}^{k,i+1} = \text{Pr}_{H_{i+1}}(\mathbf{x}^{k,i})$
5. Конец
6.  $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^{k,m}$
7. Конец
8. При  $\mathbf{y} = \mathbf{0}$  и  $\mathbf{x}_{null}^0 = \mathbf{x}^{k+1}$  выполнить  
Для  $k \geq 0$
9. Для  $i=1 \dots m$
10.  $\mathbf{x}_{null}^{k,i+1} = \text{Pr}_{H_{i+1}}(\mathbf{x}_{null}^{k,i})$
11. Конец
12.  $\mathbf{x}_{null}^{k+1} = \mathbf{x}_{null}^{k,m}$
13. Конец
14.  $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{LS}^\infty - \mathbf{x}_{null}^\infty$

Проблема неустойчивости решения обратной задачи излучения, связанная с наличием погрешности во входных данных  $\mathbf{y}_e = \mathbf{y} + \mathbf{N}(0, e)$ , решена за счет полусходимости проекционного алгоритма и теории решения некорректных задач, в частности, предложено проводить остановку алгоритма на итерации  $k$ , на которой реализуемая ошибка решения СЛАУ сопоставима с ошибкой входных данных  $e$  (уровень погрешности измерений электромагнитного поля в ближней зоне)

$$\|\mathbf{Ax}^k - \mathbf{y}\|_2 \approx \|\mathbf{N}(0, e)\|_2. \quad (6)$$

В подразделе 2.4 рассматриваются вопросы эффективности проекционного алгоритма, показано, что он обладает вычислительной сложностью по памяти  $O(N)$  с увеличенным затратами времени пропорциональными количеству итераций алгоритма. Для уменьшения затрат времени предложены два варианта проекционного алгоритма (блочный

и рандомизированный), обеспечивающих ускорение решения задачи за счет возможности параллельных вычислений в первом и экспоненциальной скорости сходимости алгоритма – во втором случае.

В главе 3 представлены численные исследования проекционного метода и алгоритмов, выполненных на расчётных данных электродинамических моделей антенн в программном комплексе HFSS, что позволило с высокой точностью определять электромагнитное поле моделей в ближней, промежуточной и дальней зонах излучения и, как следствие, проводить сопоставление результатов восстановления с эталонным распределением электромагнитного поля.

В подразделе 3.1 проводится верификация метода. Для этого ставится вопрос реализации теоретической сходимости метода (2), который, учитывая наличие численной ошибки решения СЛАУ  $\delta$  и линейности интегральных операторов L и K, осуществляющих восстановление поля, должен обеспечивать погрешность восстановления поля при  $h \rightarrow 0$  со скоростью

$$\|A(\mathbf{J}) - A(\mathbf{J}_h)\|_{H_{rot}^{-1/2}(\Gamma)} \leq Ch^{3/2} \|\mathbf{J}_h\|_{H_{div}^1(\Gamma)} + \delta \|\mathbf{J}_h\|. \quad (7)$$

Для ограничения погрешности (7) от влияния факторов, связанных с качеством и количеством исходной информации, верификация осуществлялась на данных ближнего поля трех электродинамических моделей антенн различного типа (рисунок 4), при этом вычисление погрешности восстановления электромагнитного поля антенны определялось только для дальней зоны и только в достоверном секторе восстановления  $(-\alpha_c, +\alpha_c)$ . Выборка поля осуществлялась на расстоянии  $3\lambda$  в области с фиксированным размером  $0.7 \times 0.7$  м и шагом  $\lambda/2$ , которые были выбраны с целью проведения сравнительного анализа результатов восстановления проекционным методом и методом модального разложения.

В результате решения обратной задачи излучения для последовательности аппроксимирующих функциональных пространств  $\{X_{h_i} | h_i > h_{i+1}\}$  с фиксированной ошибкой решения (3) проекционным алгоритмом  $\delta = 10^{-2}$ , полученные погрешности восстановления распределения поля в достоверном секторе восстановления (рисунок 5), соответствующие областям  $0.7 \times 0.7$  м<sup>2</sup>,  $0.6 \times 0.6$  м<sup>2</sup> и  $0.5 \times 0.5$  м<sup>2</sup>, подтвердили теоретическую сходимость решения обратной задачи излучения (7).

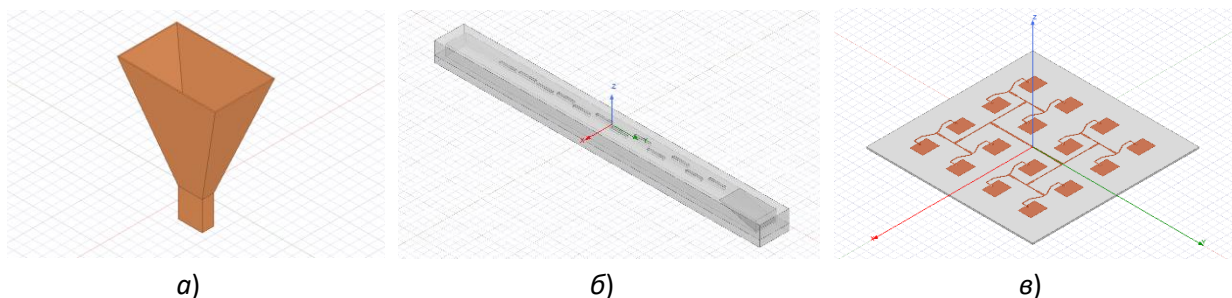


Рисунок 4 – Общие виды электродинамических моделей: рупорной антенны (а), волноводно-щелевой антенной решетки (б), микрополосковой антенной решетки (в)

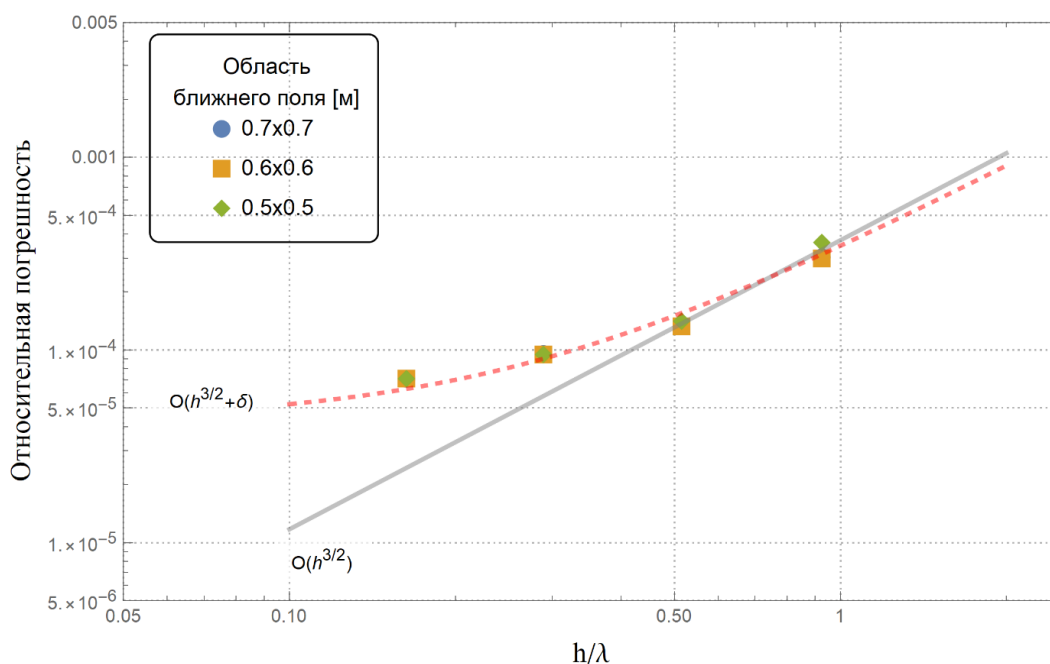
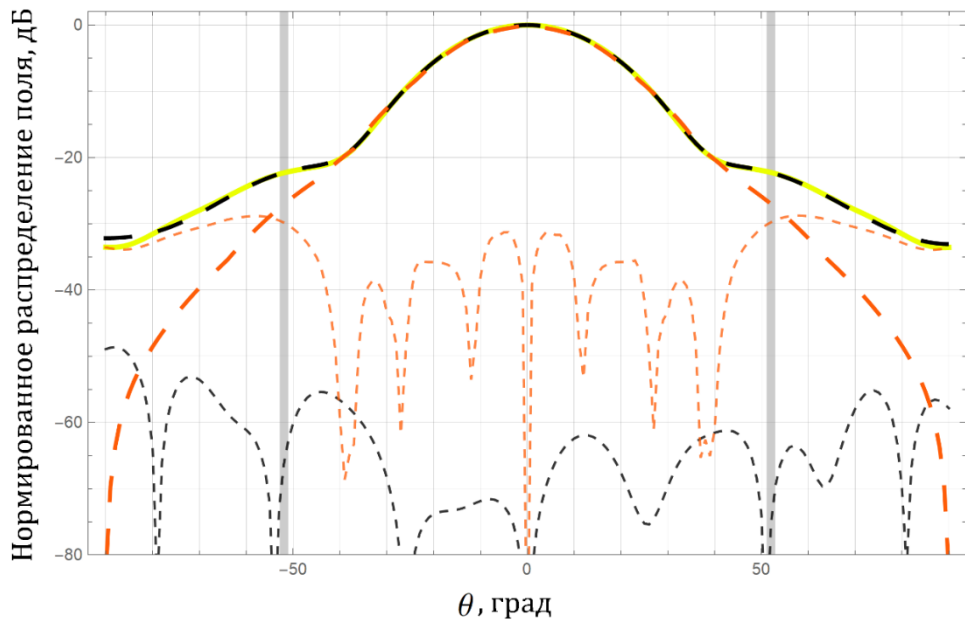


Рисунок 5 – Типичная зависимость относительной погрешности восстановления распределения поля в дальней зоне от уровня дискретизации поверхности

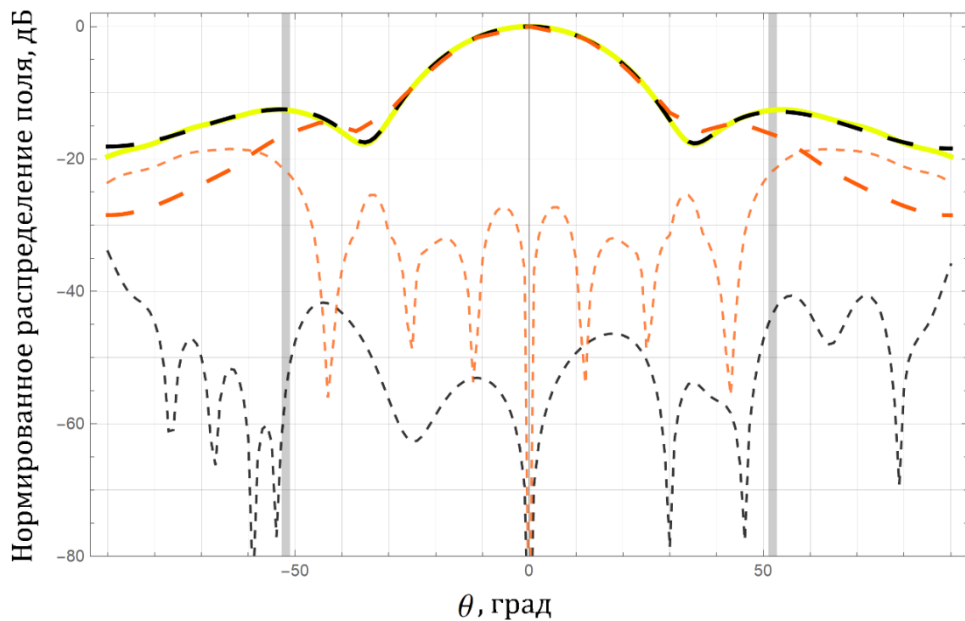
Сопоставление размерностей вектора решения и среднеквадратичной погрешности восстановления относительно уровня дискретизации ( $h/\lambda$ ) показало, что существуют две характерные точки перегиба, за пределами которых с одной стороны растет погрешность восстановления, а с другой стороны повышается вычислительная сложность задачи. Это позволило установить диапазон рабочих значений параметра дискретизации  $h$ , а также рассмотреть его оптимальное (по критерию «точность - вычислительная сложность») значение, в качестве которого было предложено принять равноудаленное относительно точек перегиба и усредненное по всем рассматриваемым моделям значение равное  $0.55\lambda$ .

Представлены результаты восстановления распределения электромагнитного поля рассматриваемых типов антенн проекционным методом с оптимальным параметром дискретизации поверхности и методом модального разложения (рисунок б), сравнение которых подтвердило, что метод модального разложения обеспечивает восстановление только в секторе восстановления  $(-\alpha_c, +\alpha_c)$ , ограниченном на рисунке б серыми

вертикальными линиями. При этом распределения полей, восстановленные проекционным методом, продемонстрировали более точные результаты в области главного максимума, в области боковых лепестков (в среднем для каждой модели эквивалентный уровень помех на 20дБ ниже), в том числе за сектором восстановления  $(-\alpha_c, +\alpha_c)$ .



*a*



*б*

желтый сплошной – точное; красный длинный пунктир – восстановленное методом модального разложения; черный длинный пунктир – восстановленная проекционным методом; красный короткий пунктир – эквивалентный уровень помех для метода модального разложения; черный короткий пунктир – эквивалентный уровень помех для проекционного метода; серыми вертикальными линиями обозначен критический сектор восстановления  $(-\alpha_c, +\alpha_c)$

Рисунок 6 – Распределение электромагнитного поля  $E$  (слева – горизонтальное, справа – вертикально сечение) рупорной антенны с апертурой  $70 \times 50 \text{ мм}^2$  в дальней зоне в  $H$ -плоскости (*a*) и  $E$ -плоскости (*б*)

В подразделе 3.2 представлены статистические численные исследования, направленные на определение требуемого количества и структуры выборок ближнего поля, обеспечивающих точное восстановление распределения электромагнитного поля антенны, которые показали, что проекционный метод, в отличие от метода модального разложения, не имеет ограничений на структуры выборок поля в ближней зоне при условии избыточности их числа.

В подразделе 3.3 проводится оценка вычислительной сложности, а также исследования эффективности численных алгоритмов. Представленные численные эксперименты подтверждают, что использование в проекционном алгоритме уравнений (3) в случайном порядке, а не в заданном порядке, значительно улучшает сходимость. При сравнении общей арифметической сложности алгоритмов  $Q$  (рисунок 7), оцениваемой с точки зрения затраченного времени с учетом реализуемых значений сходимости, показано, что, по сравнению с последовательным, блочным проекционными алгоритмами и методом сопряженных градиентов (CGM), рандомизированный проекционный алгоритм обеспечивает наилучшее вычислительное время для недоопределенных систем ( $n/m > 1$ ), где  $n$  – число базисных функций, а  $m$  – число выборок поля в ближней зоне и квазиопределенных систем и переопределенных систем ( $0.2 < n/m < 0.9$ ). Для сильно переопределенных систем ( $n/m < 0.2$ ) скорость решения последовательным и рандомизированным проекционными алгоритмами сопоставима со скоростью метода сопряженных градиентов.

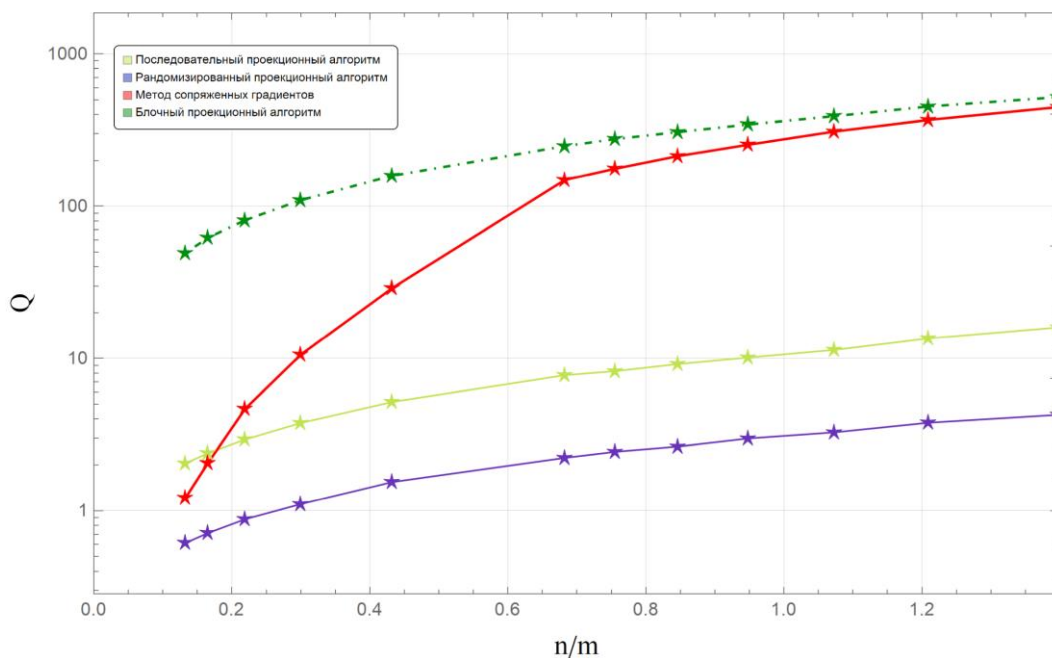


Рисунок 7 – Зависимость вычислительной сложности алгоритмов решения СЛАУ от коэффициента ее неопределенности с числом выборок поля  $m=9882$

В подразделе 3.4 проводятся исследования проекционного метода на устойчивость решения задачи при наличии ошибок (случайной составляющей) в данных ближнего поля. Подтверждено, что остановка проекционных алгоритмов, в соответствии с правилом (6), обеспечивает наряду с правилом обобщённой перекрёстной валидации (GCV) и правилом минимизации прогноза ошибки (UPRE), устойчивое решение обратной задачи излучения за минимальное вычислительное время (рисунок 8).

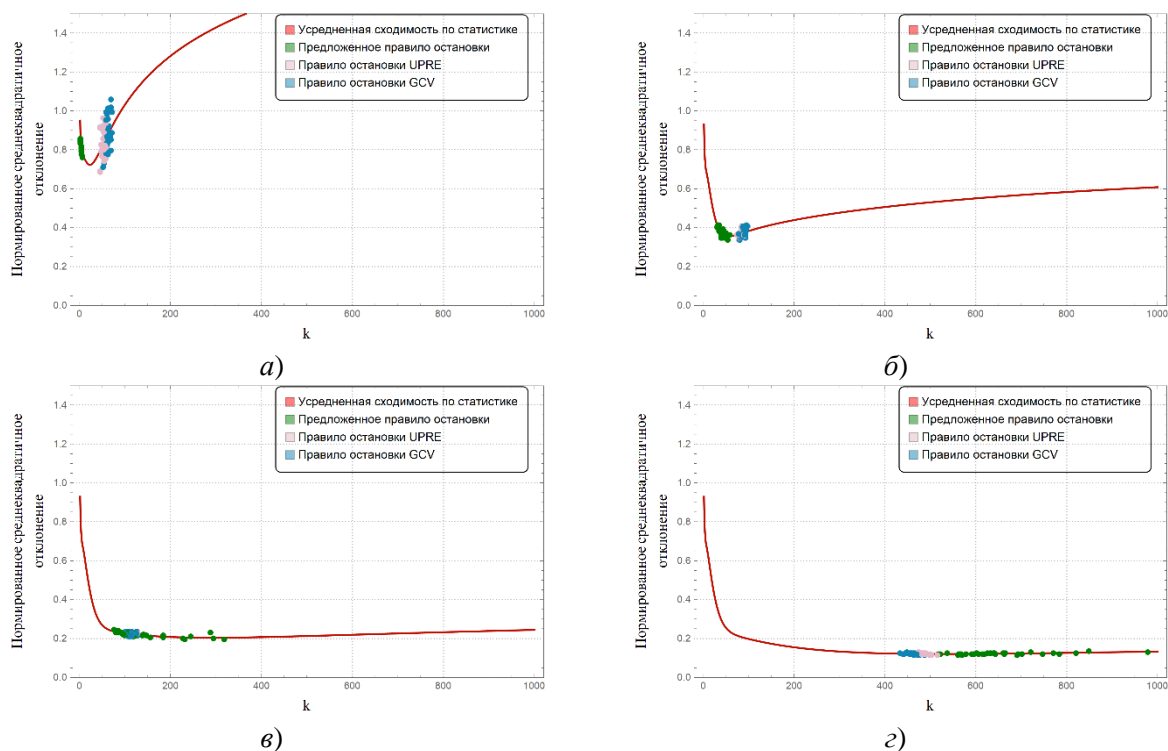


Рисунок 8 – Среднеквадратичная ошибка восстановления тока из искусственных данных ближнего поля с нормально распределенным шумом при:  $SNR=5$  дБ (а),  $SNR=15$  дБ (б),  $SNR=25$  дБ (в),  $SNR=35$  дБ (г)

Статистически определены требования к погрешности входных данных, при которых погрешность восстановления поля проекционным методом не превышает заданного уровня. Для этого методом Монте-Карло проведено 250 реконструкций электромагнитного поля в дальней зоне, где к входным данным добавлялся гауссовый шум  $N(0, SNR/3)$  с отношением сигнал/шум ( $SNR$ ) равномерно распределенным в диапазоне от 0 до 60 дБ. Полученные результаты для сектора восстановления  $(-90^\circ, 90^\circ)$  показали (рисунок 9), что для определения распределения поля проекционным методом с максимальным значением эквивалентного уровня помех, не превышающим минус 35 дБ в полном угловом секторе, отношение сигнал/шум ( $SNR$ ) при измерении должно быть не менее 35 дБ, а для определения распределения поля в угловом секторе  $(-\alpha_c, \alpha_c)$ , характерного для метода модального разложения (рисунок 9), – не менее 20 дБ.

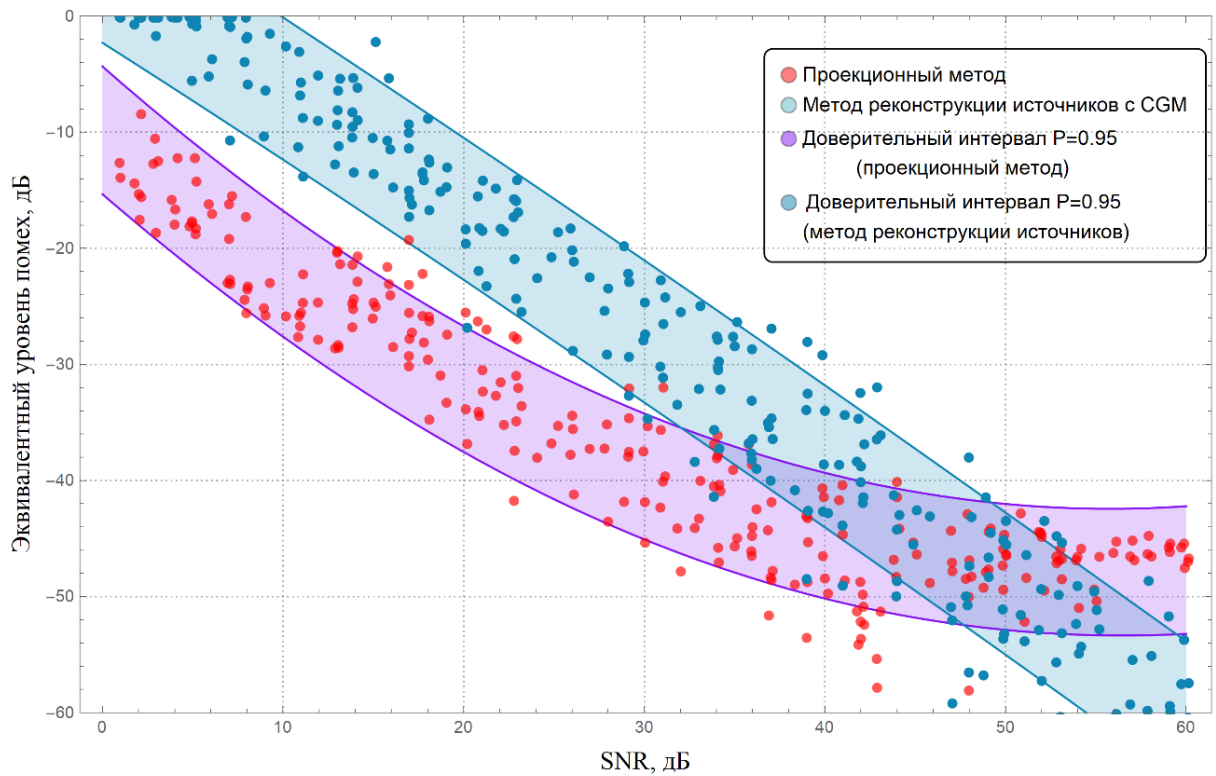


Рисунок 9 – Значения и доверительные интервалы максимального эквивалентного уровня помех в секторе восстановления  $(-90^\circ, +90^\circ)$  при различных уровнях SNR во входных данных

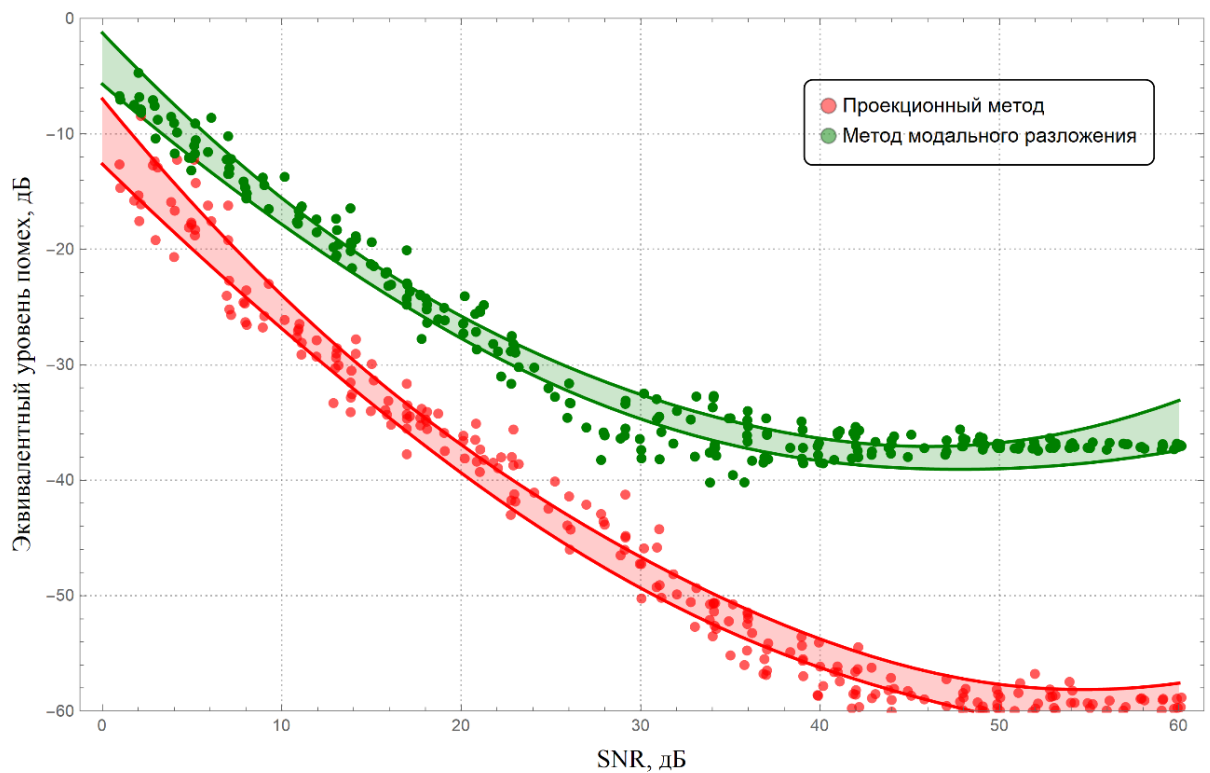


Рисунок 10 – Значения и доверительные интервалы  $(P=0.95)$  максимального эквивалентного уровня помех в секторе восстановления  $(-\alpha_c, \alpha_c)$  при различных уровнях SNR во входных данных



В главе 4 описана подготовка к применению/апробации разработанного проекционного метода на планарных сканерах ближнего поля, в которых измерение тангенциальных составляющих электрической напряженности поля осуществляется с помощью специальных датчиков поля – зондов.

В подразделе 4.1 рассматривается теория плоских волн, согласно которой измеренное напряжение  $\mathbf{S}(x, y)$  описывается интегралом свертки точного электрического поля  $\mathbf{E}(x, y)$  с пространственным откликом зонда  $\mathbf{R}(x, y)$ , позволяющая проводить компенсацию электромагнитного поля при известной характеристике  $\mathbf{R}(x, y)$ . Процедуру компенсации будем проводить в спектральной области, где интеграл свертки становится поэлементным умножением всех элементов волнового числа

$$S_v(k_x, k_y) = E_v(k_x, k_y) \cdot R_{vv}(k_x, k_y), \quad (7)$$

где,  $v$  соответствует  $x$  или  $y$  компоненте поля,  $S_v(k_x, k_y)$ ,  $E_v(k_x, k_y)$  и  $R_{vv}(k_x, k_y)$  связаны двумерным преобразованием Фурье с измеренными значениями  $S_v(x, y)$ , точными значениями электрического поля  $E_v(x, y)$  антенны и пространственным откликом зонда  $R_v(x, y)$  соответственно.

В подразделе 4.2 на основе уравнения (7) приводится полная методика коррекции, заключающаяся в определении спектрального отклика зонда  $R_{vv}(k_x, k_y)$  по результатам электродинамического расчета калибровочной модели “эталонная антенна – зонд”. Приводится подробное описание особенностей моделирования, а также выбора и построения калибровочной модели.

В подразделе 4.3 качественно и количественно охарактеризованы методические ошибки, вносимые методикой коррекции. В частности, на основе анализа поведения аддитивной, мультипликативной и импульсной модели ошибок в областях ближнего поля с квазиоднородным уровнем поля (гомогенные области) показано, что методическая ошибка имеет аддитивный характер. Далее методом Монте-Карло определено, что методическая ошибка коррелирована с ошибкой входных данных  $\sigma_{data}$  с коэффициентом корреляции  $c=1.4$  и значением собственной методической ошибки  $\sigma_{self} = 0.00307$  (рисунок 11), соответствующей погрешности минус 40.71 дБ.

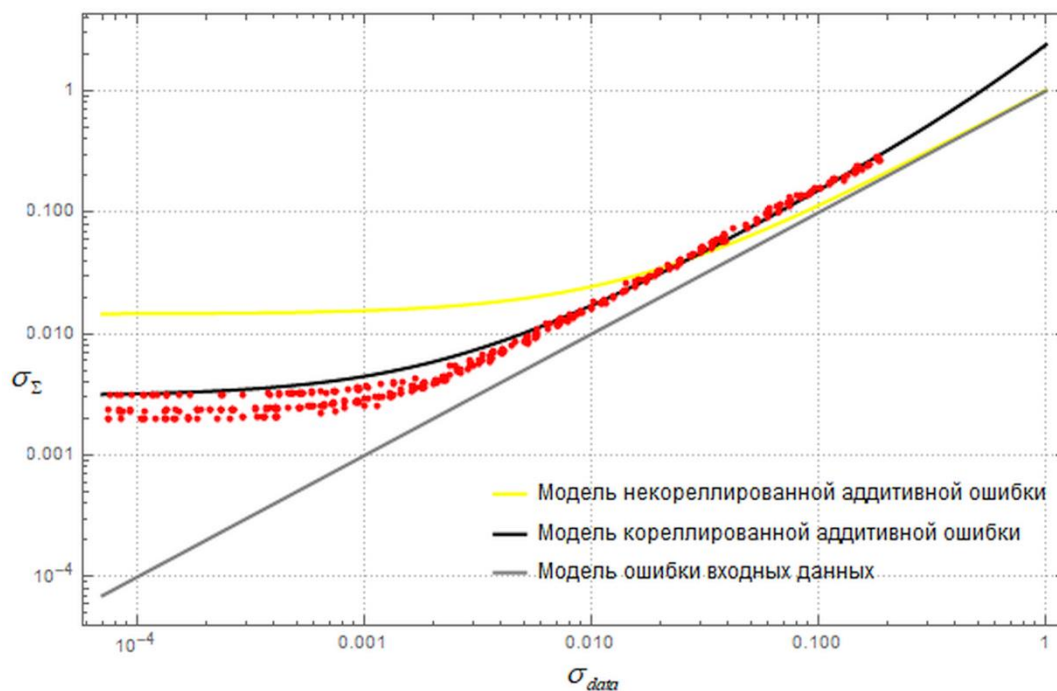


Рисунок 11 – Зависимость среднеквадратичного отклонения скорректированного поля от среднеквадратичного отклонения во входных данных (···)

В подразделе 4.4 на примере коррекции ближнего поля 4х рупорных антенн проведен сравнительный анализ результатов предложенной методики коррекции (рисунок 12), а также результатов коррекции по аналитическим формулам и экспериментальным данным, полученными из измерений рупорной антенны AP-3 (рисунок 13), который показал, что предложенная методика коррекции устраняет систематическую ошибку, обусловленную влиянием датчика поля (зонда), при этом погрешность в среднем на 7 дБ меньше по сравнению с коррекцией по аналитическим формулами и экспериментальным данным (таблица 1).

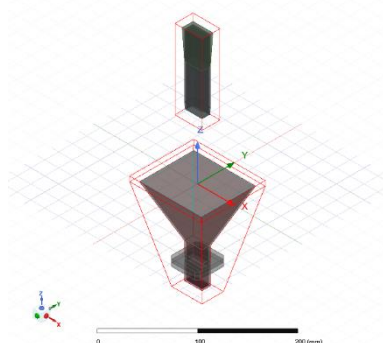


Рисунок 12 – Калибровочная электродинамическая модель “AP-3 – OEWG-90”

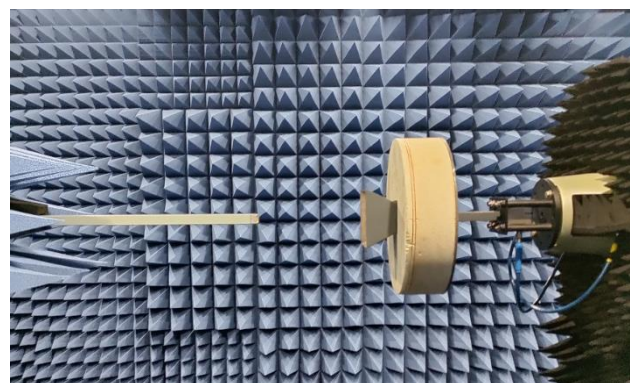


Рисунок 13 – Экспериментальная установка для калибровки на симметричной рупорной антенне AP-3 и OEWG-90

Таблица 1 Погрешность результатов измерения и коррекции основной компоненты напряженности электрического поля в ближней зоне

Модель скошенной рупорной антенны с размерами апертуры, мм <sup>2</sup>	Среднее значение эквивалентного уровня помех, дБ			
	Измеренное поле в ближней зоне	Коррекция поля по аналитическим формулам	Предложенная методика коррекции поля	Коррекция поля по экспериментальным данным
40x20	-20,74	-25,60	-32,14	-24,20
70x50	-29.34	-34.4	-42.75	-35.31
100x60	-32.22	-37.60	-44.96	-36.31
130x100	-30.74	-35.96	-42.87	-33.39

В главе 5 представлены экспериментальные исследования проекционного метода и методики коррекции, в частности, в подразделе 5.1 решается задача реконструкции электромагнитного поля в дальней зоне широконаправленной рупорной антенны СВЧ диапазона по измерениям, выполненными на планарном сканере ближнего поля в области с размерами 0.6x0.6 м<sup>2</sup>. Все результаты восстановления проекционным методом сравниваются с результатами прямых измерений, выполненных в безэховой камере, а также с результатами восстановления методом модального разложения (рисунок 14, рисунок 15).

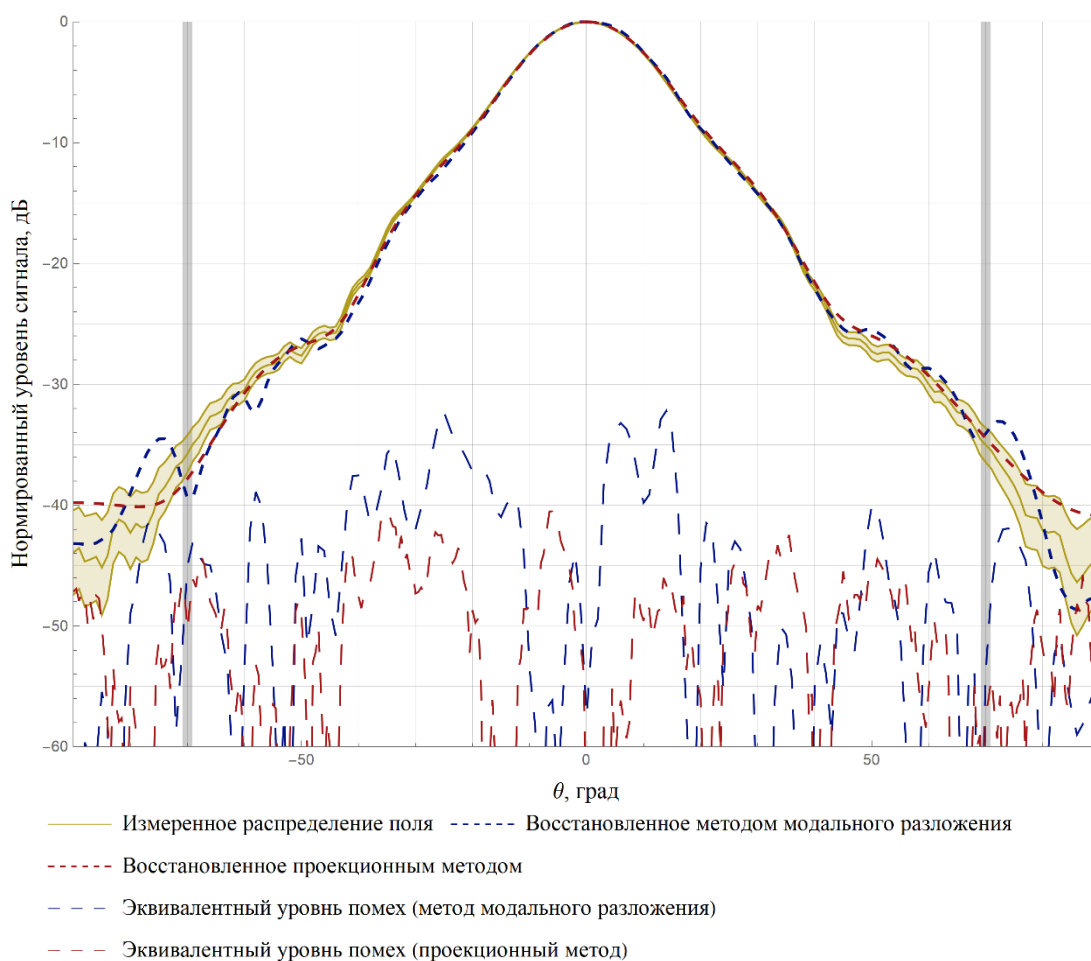


Рисунок 14 – Распределение электромагнитного поля  $E$  рупорной антенны AP-3 в Н-плоскости на 12 ГГц

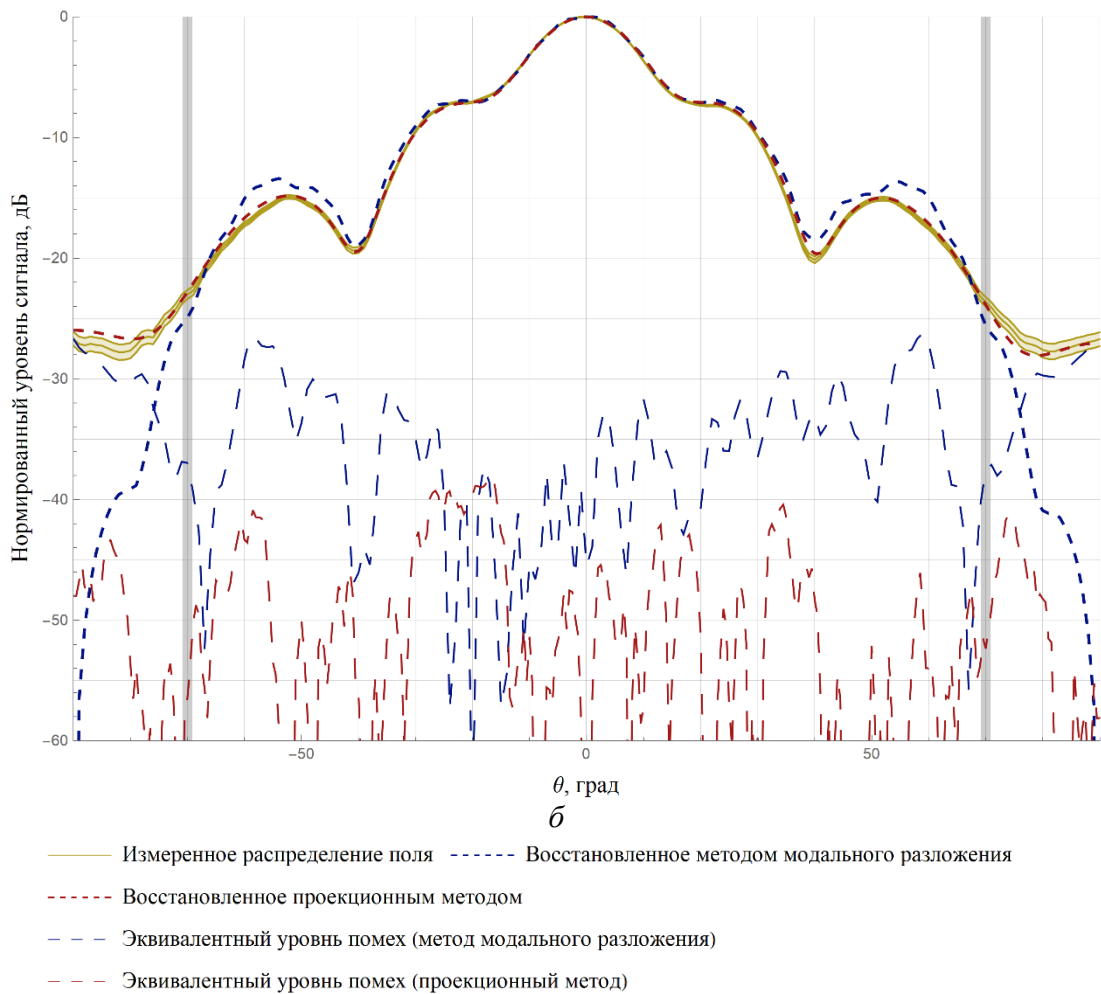


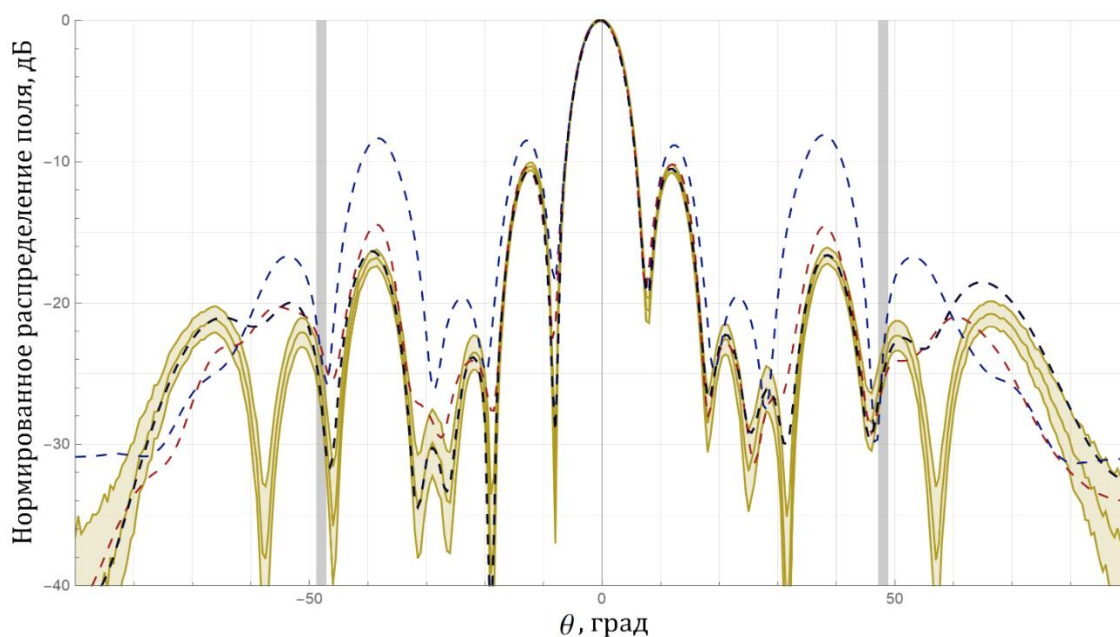
Рисунок 15 – Распределение электромагнитного поля  $E$  рупорной антенны AP-3 в  $E$ -плоскости на 12 ГГц

Результаты подтвердили, что, в отличие от метода модального разложения, распределения поля, полученные проекционным методом, согласуются с результатами измерений в полном угловом секторе ( $-90^\circ, 90^\circ$ ), при этом уровень погрешности (максимальное значение  $ENL$ ) в достоверном секторе восстановления в среднем ниже на 8.65 дБ.

В подразделе 5.2 решается задача восстановления распределения электромагнитного поля крупноапертурной микрополосковой антенной решётки в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Так, при требуемом объеме оперативной памяти, необходимом для хранения матрицы  $\mathbf{A}$  в  $\sim 3.375$  Гб, объем оперативной памяти на доступном вычислительном оборудовании составил величину в 4 Гб, из которых 1 Гб был занят операционной системой и работой других критически важных программ, в частности, программы, управляющей позиционированием датчика поля.

Решение обратной задачи излучения было достигнуто проекционным методом, при этом затраты времени были уменьшены более чем в 100 раз за счет оптимизации вычислений, а именно, предварительного расчета строк матрицы  $\mathbf{A}$  и их сохранения в постоянной памяти компьютера. Это позволило получить решение задачи за 154.8 секунды

с максимальным задействованным объемом оперативной памяти в 1.5 ГБ. Результаты реконструкции электромагнитного поля проекционным методом, а также методом модального разложения с аналитической коррекцией и предложенной методикой коррекции совместно с результатами измерений поля антенны в безэховой камере приведены на рисунке 16, из которого видно, что метод модального разложения имеет значительные ошибки в области боковых лепестков, в то время как проекционный метод обеспечивает точное восстановление как первых, так и наиболее удаленных боковых лепестков.



желтый сплошной – измеренное с доверительными интервалами; синий пунктир – восстановленное методом модального разложения с аналитической коррекцией; красный пунктир – восстановленное методом модального разложения с предложенной методикой коррекции; черный длинный пунктир – восстановленная проекционным методом с предложенной методикой коррекции; серыми вертикальными линиями обозначен критический сектор восстановления  $(-\alpha_c, +\alpha_c)$

Рисунок 16 – Распределение электрической напряженности поля в дальней зоне микрополосковой антенной решетки 10 ГГц

В подразделе 5.3 решается задача восстановления распределения электромагнитного поля узконаправленной рупорной антенны Пб-134-2, работающей на частоте 60 ГГц, при этом реконструкция поля была реализована без процедуры коррекции по квазиспиральной схеме измерения непосредственно в процессе измерений ближнего поля антенны, что позволило контролировать количество выборок поля, необходимых для точного восстановления поля, и, как следствие, сократить время измерений более чем на 30 %.

В подразделе 5.4 решается задача реконструкции распределения электромагнитного поля волноводно-щелевой антенной решётки на произвольных расстояниях от антенны. Полученные результаты восстановления поля по рассчитанным токам  $\mathbf{J}_h$ ,  $\mathbf{M}_h$  на поверхности антенны на расстояниях в 3.3, 3.8 и 9.5 м полностью согласуются с

измерениями на соответствующих расстояниях (рисунок 17 - 19), что  $g_{\text{лн}} \neq g_{\text{тн}}$  возможность восстановления распределения поля не только в заданном угловом секторе, но и на заданном диапазоне расстояний.

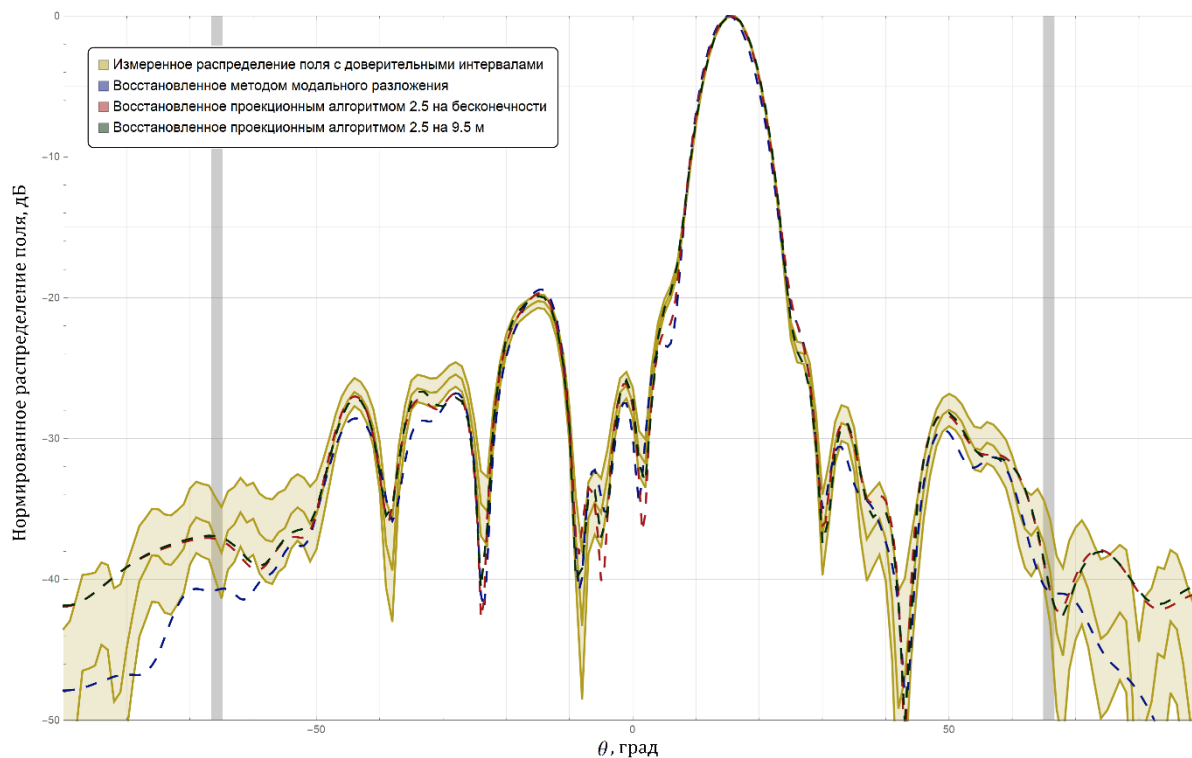


Рисунок 17 – Распределение напряженности электрического поля волноводно-щелевой антенной решетки на расстоянии 9.5 м

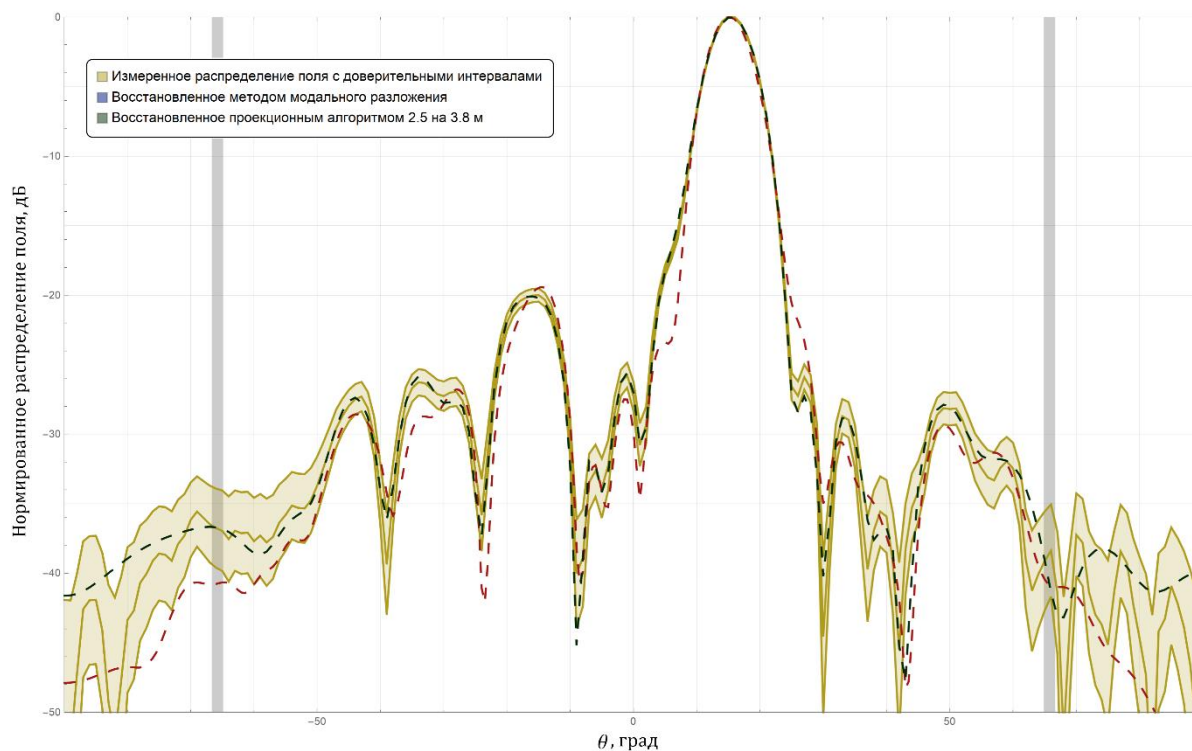


Рисунок 18 – Распределение напряженности электрического поля волноводно-щелевой антенной решетки на расстоянии 3.8 м

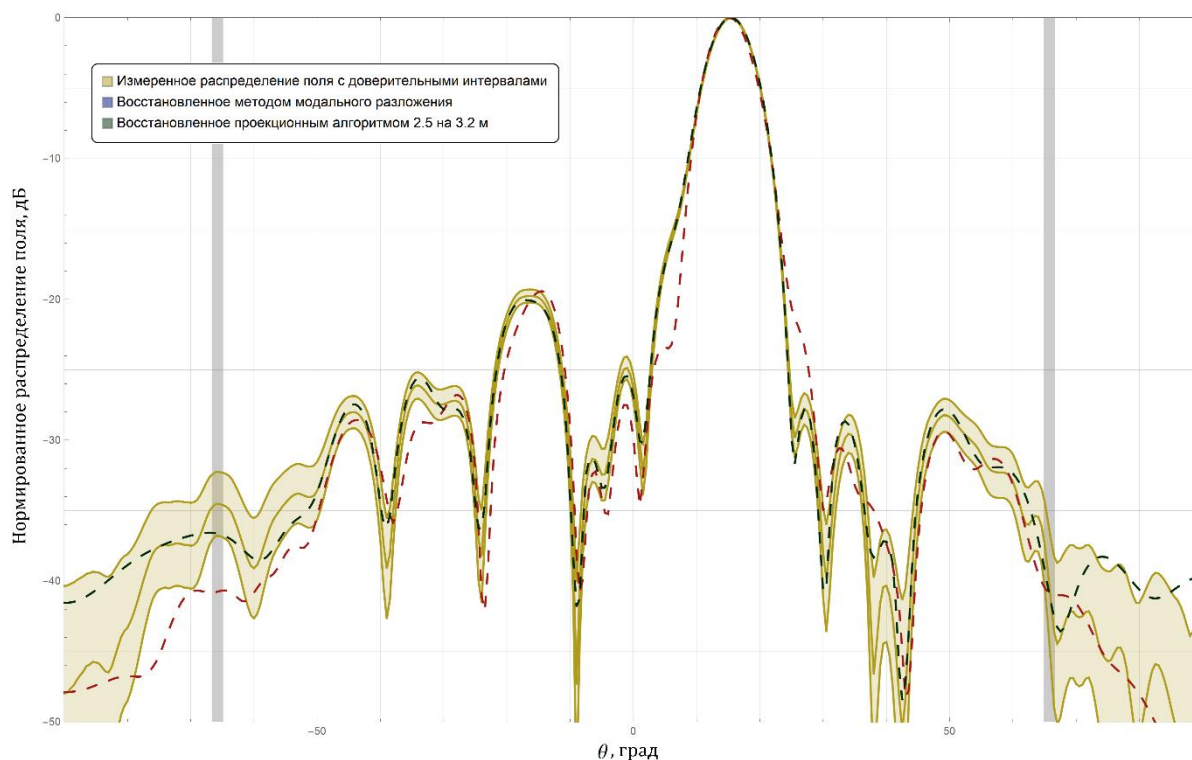


Рисунок 22 – Распределение напряженности электрического поля волноводно-щелевой антенной решетки на расстоянии 3.2 м

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате диссертационной работы разработаны численный метод решения обратной задачи излучения и методика коррекции измеренного электромагнитного поля антенны в ближней зоне, совместное использование которых обеспечивает восстановление электромагнитного поля антенны на заданном расстоянии в передней полусфере.

На основе предложенного метода разработаны алгоритмы последовательного и рандомизированного выбора проекции решения на гиперплоскости, реализованные в проекционном методе, которые позволили уменьшить вычислительную сложность по памяти до  $O(N)$  по отношению к существующим. Получена оценка оптимального уровня разбиения поверхности по критерию «точность-вычислительная сложность».

Проведено исследование разработанного метода на предмет предельных ограничений при решении задачи определения пространственного распределения электромагнитного поля антенны. Статистически доказано, что разработанный метод решения обратной задачи излучения не имеет ограничений на структуру выборок электромагнитного поля в ближней зоне при их избыточности. Определены соотношения, обеспечивающие оценку минимального числа выборок поля в ближней зоне антенны, необходимых для восстановления ее электромагнитного поля.

Проведено экспериментальное подтверждение разработанных подходов. Разработанные метод решения обратной задачи излучения и методика коррекции измерений ближнего поля антенны используются в производственном процессе для диагностики антенн АО «НИИЭП», а также при создании перспективного автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ближнего поля с системой датчиков поля в ООО «НПК «ТЕСАРТ».

Перспективами дальнейших исследований является развитие разработанных методов решения обратных задач в направлении:

- диагностики антенн, а именно реконструкции амплитудно-фазового распределения и идентификации положения элементарных источников излучения антенны решеток;
- моделирования взаимодействия антенны с близкорасположенными диэлектрическими и металлическими объектами, в т.ч. с обтекателями;
- реконструкции диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов сложных геометрических форм.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Слободяненко, А. А. Компенсация влияния зонда при измерениях ближнего поля антенны на плоскости = Compensation for the influence of the probe in measurements of the near field of the antenna on the plane / А. А. Слободяненко, В. Б. Ромодин, Л. В. Шебалкова. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2023. – № 1 (58). – С. 67–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-1-67-78. - Текст : непосредственный
2. Слободяненко, А. А. Проекционный метод решения дискретизированных обратных задач в области антенных измерений = A projection method for solving discretezed inverse problems for antenna measurements // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2022. – № 2 (55). – С. 36–45. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-36-45. - Текст: непосредственный.

### **Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) WoS**

3. Fateev, A. V. Investigation of the method of reducing the measurement time of radio technical characteristics of antennas in the near field / A. V. Fateev, S. I. Razgulyaev, A. A. Slobodyanenko // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023) : proc., Divnomorskoe, 26-30 June 2023. – Divnomorskoe : IEEE, 2023. – P. 104-107. – ISBN 979-8-3503-2238-5. DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202126. - Text : direct
4. Romodin, V. B. Near field - far field transformation with pre-correction probe technique / V. B. Romodin, A. A. Slobodyanenko, S. K. Myalkin, L. V. Shebalkova. // 24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) : proc., Novosibirsk, 29 June



– 3 July 2023. – Novosibirsk : IEEE, 2023. – P. 370–374. – ISBN 979-8-3503-3687-0. DOI 10.1109/EDM58354.2023.10225115. - Text : direct

5. Romodin, V. B. Projection Method for Inverse Problem in Antenna Measurement / V. B. Romodin, A. A. Slobodyanenko, L. V. Shebalkova. // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky : proc., Erlagol, 30 June – 4 July 2022. - Novosibirsk : IEEE, 2022. - P. 152-156. - ISBN 978-1-6654-9804-3. - DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855068. - Text : direct.
6. Shebalkova, L. V. Quantized lobe level theoretical estimates for phased array antennas applicability / L. V. Shebalkova, V. G. Edvabnik, A. A. Slobodyanenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1019 :14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), Tomsk, 2019. - Art. 012033 (6 p.). - DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012033.

#### **Доклады (тезисы) в трудах всероссийских конференций**

7. Коваленко, А. С. Микрополосковая антенная решетка для бортовых систем ближней локации = Design of microstrip array antenna for airborne applications / А. С. Коваленко, Л. В. Шебалкова, А. А. Слободяненко, В. Б. Ромодин // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 17 Всерос. Науч.-техн. Конф., Новосибирск, 20–22 апр. 2016 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 2. – С. 199–203. – 100 экз. – ISBN 978-5-7782-2920-4 ; 978-5-7782-2922-8 (Т. 2).
8. Слободяненко, А. А. Алгоритм решения обратных задач прикладной электродинамики в унитарных пространствах конечной размерности = Algorithm solving inverse problem of applied electrodynamics in unitary spaces of finite dimension / А. А. Слободяненко, В. П. Ющенко. // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 22 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 21–23 апр. 2021 г.: в 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – Т. 2. – С. 273-277. - Текст : непосредственный
9. Слободяненко, А. А. Модифицированный метод синтеза бортовой антенны с диаграммой направленности специального вида = A modified method of antenna synthesis with a special radiation patterns / А. А. Слободяненко, Л. В. Шебалкова, В. П. Ющенко ; [науч. рук. В. П. Ющенко] // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 21 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию победы в Великой Отечественной войне, Новосибирск, 7–9 окт. 2020 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Т. 2. – С. 240-246. - 30 экз. - ISBN 978-5-7782-4261-6.