

На правах рукописи



СКУЛКИН Сергей Павлович

**МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АПЕРТУРНЫХ
АНТЕНН**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского».

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор
Мальцев Александр Александрович

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор
Усанов Дмитрий Александрович
Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

доктор физико-математических наук,
профессор
Литвинов Олег Станиславович,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

доктор физико-математических наук,
Разиньков Сергей Николаевич
Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.
Гагарина (г. Воронеж)

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН

Защита состоится "14" октября 2016 г. в "14" часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 при Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУТИ.

Автореферат разослан "....." августа 2016 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета Д219.003.01



доктор физ.-мат. наук
О.И. Антипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Существенную долю всех антенн СВЧ, используемых в радиолокации, связи и т.д. составляют, так называемые, апертурные антенны, к которым обычно относят различные модификации зеркальных антенн, планарных и конформных антенных решеток, рупорных антенн и т.д. Расчет и анализ их характеристик обычно основывается на апертурной теории, появившейся еще в 50-х годах XX века [1]. Отметим, что в настоящее время результаты теории апертурных антенн, применительно к сверхкоротким импульсам становятся востребованными в лазерной физике для фокусировки лазерных импульсов в пространстве и во времени. Появилось новое направление - оптика фемто- и аттосекундных лазерных импульсов. Этот раздел физики лазеров особенно быстро развивается последние годы в связи с созданием лазеров на твердотельных активных материалах, в особенности, лазеров на сапфире, активированном титаном. Новые экспериментальные возможности делают необходимым развитие теории дифракции и фокусировки ультракоротких импульсов [2].

В апертурной теории антенна моделируется участком поверхности ограниченных размеров (апертурой или раскрывом), на которой задается распределение сторонних источников - электрического либо магнитного тока, элементов Гюйгенса и пр., либо электрическое (магнитное) поле; такого рода приближения чаще всего объединяются термином «приближение физической оптики». Расчет поля антенны в произвольной точке наблюдения при этом выполняется непосредственно по заданному распределению сторонних источников, часто с привлечением метода разложения по плоским волнам, впервые введенным в антенную технику в [3]. Различные аспекты апертурной теории изложены в многочисленных статьях и монографиях - см., например, [4] - [9].

В конце 60-х годов XX века появились первые публикации по методам реконструкции дальнего поля антенн СВЧ (диаграммы направленности), использующим результаты измерения их ближнего поля на участках плоской, цилиндрической, сферической и т.п. поверхностей [10] - [12]. Интенсивное развитие этого направления в 70-х - 80-х годах было продиктовано, прежде всего, существенным удешевлением процедуры измерений характеристик остронаправленных антенн СВЧ, не требующей использования летательных аппаратов, больших безэховых камер, вышек и т.п. Данный подход к проблеме антенных измерений тесно связан с апертурной теорией антенн, поскольку участок поверхности, на котором выполняются измерения, можно рассматривать как некоторую новую апертуру. Результаты теоретических исследований и экспериментальной апробации методов измерения характеристик антенн в ближней зоне были, в частности, обобщены в монографиях [10], [13], и обзорах [14], [15].

Отметим, что развитие методов измерения в ближней зоне стимулировало более детальное исследование структуры ближних (на расстояниях порядка размера раскрыва) полей апертурных антенн.

Вышеупомянутая теория, касающаяся как анализа структуры полей апертурных антенн и расчета их характеристик, так и преобразования их полей, измеренных в ближней зоне, в дальнюю зону, развивалась вплоть до конца 80-х годов для монохроматических сигналов и, соответственно, могла быть использована для узкополосных антенн с относительной шириной полосы в единицы-десятки процентов.

Также отметим применение метода сингулярных и гиперсингулярных интегральных уравнений для расчета характеристик зеркальных антенн, в том числе для расчета полей в ближней зоне [16-19].

При прямых измерениях ДН методом дальней зоны на конечном расстоянии между измеряемой и зондовой антеннами также существуют большие неопределенности, связанные с минимальным необходимым расстоянием и размерами обеих антенн. Критерий дальней зоны, называемый расстоянием Релея, обычно принимается $R_0 = 2D_a^2 / \lambda$ (D_a - диаметр измеряемой антенны, λ - длина волны). Данный критерий предполагает малые размеры зондовой антенны и кроме того, он справедлив для равномерного распределения поля по апертуре. В работе Роберта Хансена [20], было показано, что для антенн с низким уровнем боковых лепестков, измеряемых малым зондом, может потребоваться большее расстояние. Для увеличения отношения сигнал/шум при измерениях часто удобно использовать апертурный зонд, размеры которого сравнимы с размерами измеряемой антенны. В этом случае, по аналогии с малым зондом, обычно используется критерий $R_1 = 2(D_a + D_b)^2 / \lambda$ [21].

Здесь D_b диаметр зондовой антенны. Позднее было большое количество работ показывающих, что большая зондовая антенна дает лучшие результаты, чем малый зонд при измерении ДН [22].

В то же время в последние 15-20 лет интенсивно велись и продолжают вестись разработки сверхширокополосных антенн: зеркальных антенн со сверхширокополосными излучателями и антенных решеток из сверхширокополосных элементов с относительной полосой частот, достигающей единиц-десятков и более [23]. Хотя, в принципе, поля таких антенн в рамках "узкополосной" апертурной теории могут быть описаны как серия пространственных зависимостей полей на разных частотах, более адекватным является временное представление поля антенны в каждой точке пространства. В этом представлении можно достаточно легко проследить трансформацию временной формы излученного импульса в зависимости от положения точки наблюдения (как правило, форма излученного импульса наиболее важна, например, в

сверхширокополосной радиолокации), выявить связь геометрических соотношений в антенне либо установке для измерения характеристик антенны методами ближней зоны с положениями импульсных сигналов на временной оси и т.п. Поскольку трансформацию формы временного сигнала, прошедшего через некоторую систему, обычно принято характеризовать импульсной переходной характеристикой (ИПХ) этой системы, актуальной задачей является обобщение апертурной теории для расчета и анализа ИПХ апертурных антенн, которые являются функцией не только времени, но и положения точки наблюдения. Это же обобщение является актуальным и для методов измерений характеристик сверхширокополосных антенн в ближней зоне, поскольку результатами измерений в этом случае будут не распределения амплитуды и фазы электромагнитного поля на поверхности измерений, как в случае монохроматического сигнала, а совокупности временных форм сигнала в различных точках поверхности измерений.

Одной из первых работ в этом направлении можно считать [24], где, с одной стороны, был предложен основной принцип расчета ИПХ апертурных антенн: вычисление собственно ИПХ апертуры, и, с другой стороны, предложен и экспериментально апробирован метод реконструкции ИПХ широкополосной антенны в дальней зоне по результатам измерений временных зависимостей импульсных сигналов в ближней зоне на участке гладкой поверхности произвольной формы. Дальнейшее развитие этого подхода, выполненное автором, а также исследования других авторов - создание теории преобразования ИПХ, измеренных в ближней зоне, в дальнюю зону с коррекцией направленных свойств зонда для плоской, цилиндрической и сферической поверхностей [25], [26] и исследования ИПХ различных апертур [27] - [38] показало актуальность исследования более частных вопросов: анализа особенностей ИПХ апертуры в зависимости от ее формы и положения точки наблюдения, расчета и анализа типичных ИПХ конкретных типов апертурных антенн, точности реконструкции ИПХ по результатам измерений временных зависимостей поля в ближней зоне, возможностей режекции отражений от элементов измерительной установки и различных границ при подобных измерениях, выбора расстояния между испытываемой антенной и зондом при прямых измерениях ИПХ в дальней зоне.

Для расчета полей апертурных антенн во временной области разработано большое количество численных методов. Одним из наиболее простых методов широкополосных сигналов является метод конечных разностей во временной области (FDTD) и его различные модификации. Основной проблемой большинства разностных схем является нестабильность при длительном процессе интегрирования и ограничения связанные с накоплением фазовой ошибки [39]. Величина шага дискретизации по пространству должна быть значительно меньше

исследуемых длин волн и типичных размером исследуемой структуры. Поэтому при больших D/λ и при необходимости анализа больших областей пространства эти методы часто становятся нереализуемыми даже на самых мощных компьютерах.

Преимущество предлагаемых методов расчета поля антенны во временной области перед численными методами является простота и повышение точности при росте D/λ без увеличения требований к производительности компьютера. Точность метода физической оптики, используемый в апертурной теории антенн растет при росте D/λ . Выражение для тока в используемом токовом методе расчета поля является точным для бесконечной металлической плоскости. Влияние краевых эффектов на краях апертуры быстро уменьшается при росте D/λ . Данные особенности дают возможность анализа больших областей пространства, например, возможность определения оптимального размера апертуры зонда и оптимального расстояния между антеннами при прямых измерениях параметров антенн, требующее расчета поля в разных точках апертуры зонда при разных его размерах и разных расстояниях между антеннами.

Цель работы.

Целью настоящей диссертации является разработка методов расчета пространственно-временных характеристик сверхширокополосных апертурных антенн.

Указанная цель достигается решением следующих задач.

1. Разработать метод расчета полей апертурных антенн во временной области.
2. Провести расчет и анализ импульсных переходных характеристик круглой плоской апертуры с равномерным распределением поля.
3. Провести расчет и анализ импульсных переходных характеристик круглой плоской апертуры со спадающего к краям апертуры распределениями поля.
4. Провести расчет и анализ импульсных переходных характеристик плоских апертур прямоугольной формы.
5. Провести расчет и анализ импульсных переходных характеристик прямофокусных и офсетных зеркальных антенн с учетом поляризации и определить влияние фокусного расстояния.
6. Провести расчет и анализ импульсных переходных характеристик при передаче сигнала между двумя антеннами для линейных, круглых и прямоугольных апертур.
7. Провести анализ погрешностей при прямых измерениях диаграммы направленности апертурным зондом.

8. Разработать и экспериментально апробировать метод реконструкции временных зависимостей поля в дальней зоне по временным зависимостям поля в ближней зоне.
9. Провести анализ особенностей восстанавливаемого дальнего поля.

Методы исследования. Решение обозначенных задач основывается на:

- обобщении апертурной теории антенн для случая временной зависимости сигналов;
- использовании техники интегрирования дельта-функции сложного аргумента, позволяющей в каждый момент времени свести интегрирование по поверхности к интегрированию по линии;
- методах прямых измерений характеристик антенн;
- методах измерений антенн в ближней зоне.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов определяется:

- использованием обоснованных физических моделей и строгих математических методов решения поставленных задач,
- экспериментальной проверкой, сравнительным анализом с результатами современных исследований,
- научными работами, их апробацией на научных конференциях, лекциях и семинарах автора.

Научная новизна.

1. Предложен метод расчета пространственно-временной структуры полей широкополосных апертурных антенн во временной области (аналог метода физической оптики), позволяющий снизить размерность задачи и во многих случаях получать простые аналитические выражения для пространственного распределения первообразных импульсных переходных характеристик антенн. Проанализировано пространственное распределение импульсных полей плоских апертур различной формы с различными распределениями поля на раскрыве; в частности, показано, что импульсное ближнее поле антенны в прожекторном луче состоит из нескольких разделенных по времени импульсов, первый (по времени прихода) имеет максимальную амплитуду и определяется локальными свойствами апертуры в точке пересечения нормали к апертуре выходящей из точки наблюдения, остальные задержанные по времени импульсы определяются формой антенны и координатами точки наблюдения.

2. На основе предложенного подхода получена и исследована структура различных поляризационных компонент импульсного ближнего и дальнего поля зеркальных антенн.

3. Предложенный подход обобщен для расчёта пространственного распределения первообразных импульсных переходных характеристик при

передаче сигнала между двумя апертурными антеннами, на его основе проанализированы погрешности прямых измерений диаграммы направленности апертурным зондом, в частности определены требования к оптимальному размеру зонда.

4. Предложен и экспериментально апробирован метод реконструкции временных зависимостей поля антенны в дальней зоне по временным зависимостям поля в ближней зоне.

Практическая значимость.

Предложенные методы расчета импульсных полей сверхширокополосных апертурных антенн и полученные на их основе выражения позволяют:

- а) достаточно эффективно анализировать различные особенности этих антенн, как в дальней зоне, так и на близких расстояниях;
- б) значительно упростить расчет характеристик антенн в широком диапазоне частот;
- в) сократить расстояние между антеннами при прямых измерениях диаграммы направленности методом дальней зоны.

Предложенный и экспериментально апробированный метод реконструкции временных зависимостей поля антенны в дальней зоне по временным зависимостям поля в ближней зоне с использованием импульсных зондирующих сигналов позволяет восстанавливать дальнее поле антенны без использования дорогостоящих безэховых камер.

Теоретическая значимость определяется разработкой новых методов расчета пространственно-временных зависимостей полей сверхширокополосных апертурных антенн для всего полупространства перед антенной. Предложенные методы позволяют значительно упростить решение большого количества задач теории апертурных антенн и методов их измерений.

К защите предъявляются следующие основные положения.

1. Метод расчета пространственно-временной структуры полей сверхширокополосных апертурных антенн, позволяющий снизить размерность задачи и в некоторых случаях представлять структуру поля в виде простых аналитических выражений.
2. Обобщение предложенного метода для случая прямофокусных и офсетных зеркальных антенн с учетом кривизны зеркала и поляризации.
3. Метод расчета первообразной импульсной переходной характеристики при передаче сигнала между двумя апертурными антеннами.
5. Оптимальный размер зонда и оптимальное расстояние между антеннами при прямых измерениях диаграммы направленности апертурным зондом.
6. Метод реконструкции временных зависимостей поля антенны в дальней

зоне по временным зависимостям поля в ближней зоне.

Апробация результатов.

Результаты работы докладывались на 21 конференции, симпозиуме и ассамблее: на XX Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура" (ИРФЭ, Ереван, 1985 г.), на IV Всесоюзной конференции "Метрологическое обеспечение антенных измерений" (ВНИИРИ, Ереван, 1987 г.), на всесоюзной научно-технической конференции "Применение сверхширокополосных сигналов в радиоэлектронике и геофизике" (Красноярск, 1991 г.), на международной конференции "Теория и техника антенн" (Москва, 1994), на международном симпозиуме EUROEM-94 (Франция, Бордо), на XII международном конгрессе по электромагнитной совместимости EMC-94 (Польша, Вроцлав), на международных конференциях по точным электромагнитным измерениям CREM'94 (США, Боулдер), CREM'96 (Брауншвайг, Германия), на международных симпозиумах по антеннам JINA'94 и JINA'96 (Франция, Ницца), на IX международной конференции по антеннам и распространению радиоволн ICAP'95 (Нидерланды, Эиндховен), на международном симпозиуме AMEREM'96 (Альбукерке, США), на международных симпозиумах "Прогресс в электромагнитных исследованиях" (PIERS'95, Сизтл, США и PIERS'98, Нант, Франция) на 25-й и 26-й Генеральных ассамблеях URSI (Лиль, Франция, 1996г и Торонто, Канада, 1999г.), на симпозиумах AP-S/URSI (Монреаль, Канада, 1997г., Ньюпорт Бич, США, 1995г. и Бостон, США, 1995 и 2001г.), на международном симпозиуме High Power & Ultrawideband Short-Pulse Electromagnetics - EUROEM-2000, Эдинбург, Шотландия, а также на семинарах кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ, Университета г. Брюссель (VUB) и городской секции IEEE (Альбукерке, США).

На международном симпозиуме "Прогресс в электромагнитных исследованиях" (PIERS 1998, Нант, Франция) автором данной работы была организована секция, посвященная методам исследования характеристик антенн во временной области. Автор читал лекции и проводил семинары по результатам данной работы в крупнейших национальных лабораториях США: Национальном институте стандартов и технологий США (NIST, Боулдер), Rome Laboratory Hanscom AFB (Бостон, США), Phillips Laboratory AFMC (Альбукерке США).

Результаты данной работы отмечались: как основные результаты года в электромагнетизме в пленарных докладах симпозиума международного радиосоюза (URSI); отчете NASA (Национального управления США по воздухоплаванию и исследованию космического пространства). Ссылки на статьи автора имеются в более, чем в 40 публикациях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-02-17728), гуманитарного проекта Евросоюза по

созданию георадара для поиска противопехотных мин (EUDEM), гранта офиса Научных Исследований ВВС США (AFOSR), гранта Швейцарской Академии технологических наук, двух грантов Международного радиосоюза (URSI).

Публикации.

- Основные результаты опубликованы в 56 работах, в том числе:
- в 18 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, включая: Известия вузов Радиофизика, Антенны, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Радиотехника и электроника, Вестник ННГУ, Progress In Electromagnetics Research M [A1] - [A18];
 - в двух авторских свидетельствах [A19], [A20];
 - в 5 разделах в книгах [A21]- [A25];
 - в 12 статьях в трудах конференций и симпозиумов [A26] - [A37];
 - в 19 тезисах докладов научных конференций [A38] - [A56].

Личный вклад автора.

Основные результаты получены автором самостоятельно.

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены автором самостоятельно.

19 работ [A2, A4, A7, A8, A23, A25, A31, A33, A34, A35, A37] и др. выполнены автором самостоятельно.

В большинстве работ, опубликованных в соавторстве [A3, A5, A14, A16, A17, A18, A21, A22, A24] соискателю принадлежит ведущая роль при постановке задачи, ее исследовании и получении результатов.

В работы [A1, A6, A9, A10, A13, A15] вклад соавторов примерно одинаков.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 253 страницы машинописного текста, включая 121 рисунок и список литературы, содержащий 213 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, сформулированы цели работы, ее научная новизна, научная и практическая значимость, а также кратко излагается содержание работы

В **первой главе** предложены методы расчета импульсных полей плоских апертур.

В **разделе 1.1** показана новизна предложенного подхода. Любая антенна может характеризоваться пространственно-частотной зависимостью поля

$E(\omega, \vec{r})$, где ω - частота, r - радиус вектор точки наблюдения, либо связанной с ней преобразованием Фурье пространственно-временной зависимостью поля $E_a(t, \vec{r})$. При этом поле в частотной области представляется как $E_a(\omega, \vec{r}) = S_0(\omega) \tilde{E}(\omega, \vec{r})$, здесь $S_0(\omega)$ - спектр возбуждающего сигнала. Соответственно поле во временной области: $E_a(t, \vec{r}) = S_0(t) \otimes E'(t, \vec{r})$, здесь $S_0(t)$ - возбуждающий сигнал, \otimes - операция свертки, $E'(t, \vec{r})$ - импульсная переходная характеристика апертуры. В рамках апертурной теории антенн поле в полупространстве перед антенной представляется в виде интеграла по апертуре:

$$\tilde{E}(\omega, \vec{r}) = \frac{i\omega}{2\pi c} \iint_{S_a} g(\vec{r}_a, \omega) \frac{e^{i\omega|\vec{r}-\vec{r}_a|/c}}{|\vec{r}-\vec{r}_a|} dS_a, \text{ здесь } g - \text{ распределение поля по}$$

апертуре, \vec{r}_a - радиус вектор точки на апертуре, для простоты приводится скалярное приближение, соответствующее основной поляризации. Пределы применимости апертурной теории хорошо известны: $D \gg \lambda$ (D - диаметр апертуры, λ - длина волны) и точка наблюдения лежит перед апертурой. По аналогии поле во временной области может быть формально представлено следующим образом:

$$\tilde{E}(t, \vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int E(\omega, \vec{r}) \exp(-i\omega t) d\omega = \frac{1}{2\pi c} \frac{d}{dt} \iint_{S_a} \frac{g(\vec{r}_a) \delta(t - |\vec{r} - \vec{r}_a|/c)}{|\vec{r} - \vec{r}_a|} dS_a,$$

здесь δ - дельта функция. В этот интеграл, вообще говоря, входят и частоты, для которых требование $D \gg \lambda$ нарушается. Будем, однако, считать, что запрашивающий антенну широкополосный импульс ограничен снизу по частоте, причем для этой граничной частоты приближение апертурной теории выполняется. Тогда свертка возбуждающего импульса с импульсной переходной характеристикой апертуры в виде интеграла, содержащего δ -функцию, будет корректно описывать импульсное поле антенны, и в этом смысле введенная импульсная переходная характеристика апертуры является корректной. Она достаточно просто зависит от координат точки наблюдения, в том числе при ее близком расположении к апертуре, что и определяет ее ценность как инструмента исследования характеристик антенны.

Для вычисления ИПХ используется формула для интегрирования дельта-функции сложного аргумента:

$$E(t, \vec{r}) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} g(\vec{r}_a) d\phi, & (ct > z) \cap (\Gamma \cap S_a \neq \emptyset); \\ 0, & (ct < z) \cup (\Gamma \cap S_a = \emptyset), \end{cases}$$

при этом для каждого момента времени интегрирование по поверхности сводится к интегрированию по линии пересечения сферы радиуса ct и апертуры. В результате в каждый момент времени t получаем одномерный интеграл. Здесь Γ - кривая, определяемая уравнением $ct = |\vec{r} - \vec{r}_a|$ и представляющая собой окружность радиуса $b_t = \sqrt{(ct)^2 - z^2}$ с центром в точке $\vec{\rho}$, $\vec{\rho}$ - проекция вектора \vec{r} на апертурную плоскость, z - расстояние от точки, определяемой \vec{r} до апертурной плоскости. Интеграл берется по углу ϕ , под которым дуга окружности Γ , лежащая внутри области апертуры, видна из проекции точки наблюдения на апертурную плоскость, концевые углы $\phi_{1,2}$ определяются точками пересечения окружности Γ с краями S_a , a - радиус апертуры.

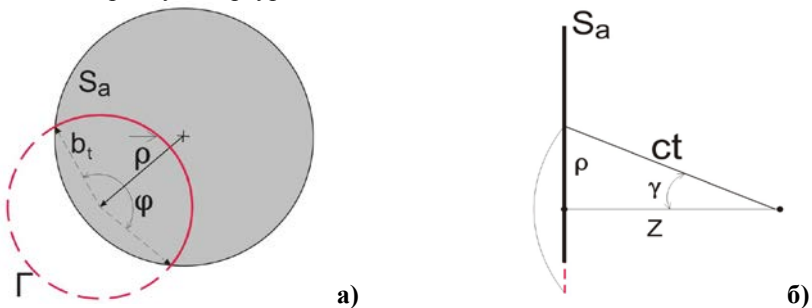


Рис. 1. а), б) положение точек наблюдения.

Здесь γ – угол между нормалью к апертуре \vec{n} и радиус вектором точки наблюдения из каждой точки на апертуре $(\vec{r} - \vec{r}_a)$. Из геометрических соображений можно получить, что косинус угла γ для всех точек кривой Γ выражается как $\frac{z}{ct}$. В дальнейшем мы в основном будем оперировать с первообразной ИПХ, которая более наглядно отображает различные особенности импульсного поля.

Раздел 1.2 посвящен описанию поля круглой плоской апертуры с равномерным распределением амплитуды.

В **подразделе 1.2.1** находятся временные зависимости поля в обратных

тригонометрических функций для всех точек полупространства перед апертурой:

$$E(t, \rho, z) = \begin{cases} 0, & 0 < ct < z; \\ 0, & z < ct < \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2}, \rho > a; \\ 1, & z < ct < \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2}, \rho < a; \\ \frac{\varphi}{2\pi}, & \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2} < ct < \sqrt{z^2 + (a + \rho)^2}; \\ 0, & ct > \sqrt{z^2 + (a + \rho)^2} \end{cases}$$

$$\varphi = 2 \arccos \left(\frac{\rho^2 + b_t^2 - a^2}{2\rho b_t} \right).$$

Здесь $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ - проекция вектора \vec{r} на апертурную плоскость, a - радиус апертуры. Здесь обсуждаются особенности пространственно-

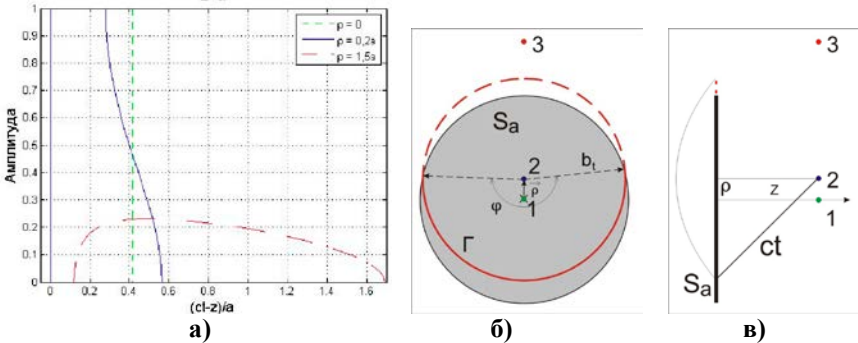


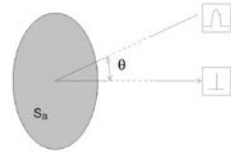
Рис.2. а) первообразная ИПХ круглой апертуры в ближней зоне; рисунки б), в) показывают положение точек наблюдения.

временных зависимостей поля в ближней зоне в границах и за границами прожекторного луча антенны и в дальней зоне. Показано, что в пределах прожекторного луча первообразная ИПХ имеет вид импульса с коротким передним фронтом, определяемым точкой пересечения апертуры и перпендикуляра из точки наблюдения к апертуре (см. рис.1а). Задний фронт импульса определяется координатами точки наблюдения, формой апертуры и диаграммой направленности элемента апертуры. Если пренебречь ДН элемента апертуры, то на оси круглой апертуры первообразная ИПХ имеет вид прямоугольника, ширина которого уменьшается при удалении от апертуры. За пределами прожекторного

луча амплитуда первообразной ИПХ падает и фронты размываются (см. рис.2а).

В **подразделе 1.2.2** приведены выражения для поля круглой плоской апертуры в дальней зоне, определяемого в каждый момент времени как интеграл по отрезку прямой линии (сферы бесконечного радиуса) находящемуся на апертуре:

$$f(t, \theta) = \begin{cases} \frac{\cos^2 \theta}{\pi \sin^2 \theta} \sqrt{(a \cdot \sin \theta)^2 - (ct)^2}, & |ct| < a \cdot \sin \theta \\ 0, & |ct| > a \cdot \sin \theta \end{cases}$$



здесь $f(t, \theta)$ - первообразная ИПХ в дальней зоне, θ - угол в дальней зоне. Внешний вид этой зависимости показан на рисунке 4а. Показано, что в силу ограниченности снизу полосы излучаемого сигнала при объяснении поведения реальных сигналов в некоторых случаях удобнее оперировать не с первообразной ИПХ, а с ИПХ.

В **подразделе 1.2.3** обсуждаются ИПХ в ближней зоне. Показано, что ИПХ состоит из двух сдвинутых по времени импульсов, разной формы, амплитуды и полярности. Первый по времени импульс имеет короткий передний фронт, определяемый точкой пересечения апертуры и перпендикуляра из точки наблюдения к апертуре. Второй по времени импульс определяется координатами точки наблюдения, формой апертуры и диаграммой направленности элемента апертуры.

В **подразделе 1.2.4** обсуждаются ИПХ в дальней зоне. Показано, что ИПХ состоит из двух одинаковых сдвинутых по времени импульсов, разной полярности. При увеличении угла наблюдения, расстояние между импульсами возрастает, а их амплитуда падает.

В **подразделе 1.2.5** приведены выражения для первообразной ИПХ прямоугольной апертуры в ближней зоне. Описываются характерные особенности и приводятся графики импульсного поля в ближней зоне, в пределах и за пределами прожекторного луча, на разных расстояниях от апертуры. Проведен сравнительный анализ импульсных полей прямоугольной и круглой апертур. Показано, что задний фронт первообразной ИПХ прямоугольной апертуры в общем случае имеет более сложную зависимость от времени, определяемую границами апертуры.

В **подразделе 1.2.6** приведены выражения для первообразной ИПХ прямоугольной апертуры в дальней зоне.

Раздел 1.3 посвящен описанию импульсного поля в ближней зоне круглой плоской апертуры при спадающих к краям распределениях поля по апертуре.

В **подразделе 1.3.1** приведены аналитические выражения для первообразной ИПХ круглой апертуры полученные для распределений по

апертуре вида $g(\rho_a) = (1 - \rho_a^2/a^2)^n$, где $\rho_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$, $n = 1, 2, \dots$. В частности в случае $n = 1$ с было получено:

$$E(t, \rho, z) = \frac{z^2}{(ct)^2} \begin{cases} 0, & 0 < ct < z; \\ 0, & z < ct < \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2}, \rho > a; \\ 1 - \frac{\rho^2 + b_t^2}{a^2}, & z < ct < \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2}, \rho < a; \\ \frac{\varphi}{2\pi} \left(1 - \frac{\rho^2 + b_t^2}{a^2} \right) + \frac{2\rho b_t}{\pi a^2} \sin(\varphi/2), & \sqrt{z^2 + (a - \rho)^2} < ct < \sqrt{z^2 + (a + \rho)^2}; \\ 0, & ct > \sqrt{z^2 + (a + \rho)^2}. \end{cases}$$

Здесь же приведено выражение для поля в случае $n = 2$.

В **подразделе 1.3.2** обсуждаются поля в ближней зоне. При удалении от оси апертуры в пределах прожекторного луча ($0 < \rho < a$) задний фронт первообразной ИПХ начинает растягиваться (см. рис.3б); его длительность уменьшается при увеличении скорости спада амплитудного распределения. Для спадающих к краям распределений поля при приближении к краю прожекторного луча ($\rho \approx a$, см. рис.3в) форма первообразной ИПХ приближается к форме за пределами прожекторного луча (см. рис. 3г).

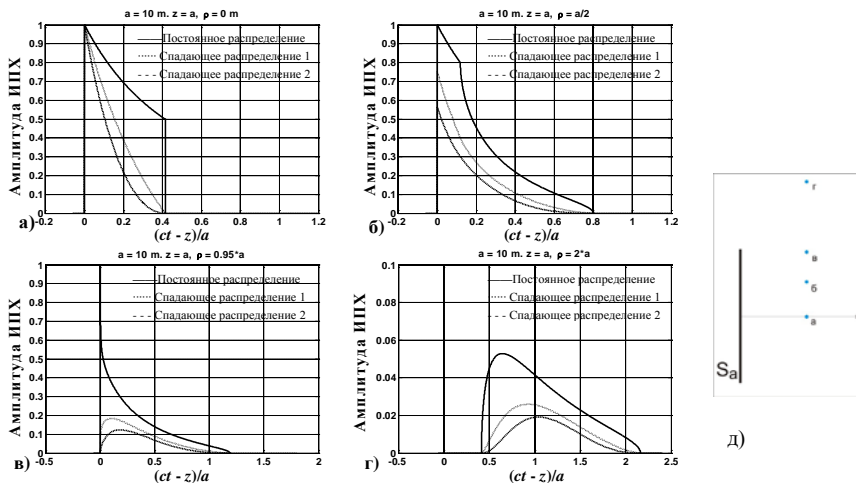


Рис.3. Графики временных зависимостей ИПХ в ближней зоне при $z = a, \rho = 0$ (а), $\rho = 0,5a$ (б); $\rho = 0,95a$ (в) и $\rho = 2a$ (г) для трех распределений амплитуды поля по апертуре: равномерное распределение, спадающее с $n = 1$, спадающее с $n = 2$; д) положение точек наблюдения.

Показано, что уменьшение амплитуды к краям апертуры приводит к существенному видоизменению временной формы ИПХ: уменьшается по амплитуде или исчезает второй импульс на оси апертуры, а частотная характеристика апертуры в этом направлении становится более равномерной. В области боковых лепестков (вне зоны прожекторного луча) исчезают сильные всплески первообразной ИПХ на начальном и конечном участках, характерные для постоянного амплитудного распределения. Понижается также уровень первообразной ИПХ, что соответствует известному снижению уровня боковых лепестков для спадающих распределений в случае работы антенны на фиксированной частоте.

Раздел 1.4 посвящен описанию импульсного поля в дальней зоне круглой плоской апертуры при спадающих к краям распределениях поля по апертуре.

В **подразделе 1.4.1** приведены аналитические выражения для первообразной ИПХ круглой апертуры полученные для распределений

поля по апертуре вида $q = \left(1 - \frac{\rho_a^2}{a^2}\right)^n$, диаграмма направленности во

временной области в каждый момент времени равна:

$$f(t, \theta) = \begin{cases} \frac{\cos^2 \theta}{\pi \sin^2 \theta} \sqrt{(a \cdot \sin \theta)^2 - (ct)^2} \cdot \left(1 - \frac{(ct)^2}{(a \cdot \sin \theta)^2}\right)^n, & |ct| < a \cdot \sin \theta \\ 0, & |ct| > a \cdot \sin \theta \end{cases}$$

В **подразделе 1.4.2** приведено обсуждение первообразной и ИПХ в дальней зоне при разных распределениях поля по апертуре. Как видно из рисунка 4а,б при равномерном распределении поля по апертуре крутизна фронтов производной ИПХ наибольшая и, соответственно, ИПХ имеет наибольшую амплитуду и состоит из двух разнесенных коротких импульсов с нулевой амплитудой поля между ними. Отметим, что здесь амплитуды всех графиков ИПХ приведены к одной величине, иначе ИПХ для равномерного распределения примерно в 30 раз больше по амплитуде, чем ИПХ для спадающих распределений. При увеличении скорости падения амплитуды от центра к краям апертуры максимумы двух импульсов смещаются к центру. Отметим, что в направлении главного максимума первообразная ИПХ имеет форму δ -импульса для любых распределений поля по апертуре. В этом случае поверхность интегрирования совпадает с плоскостью апертуры.

В **разделе 1.5** обсуждаются пространственные распределения амплитуд монохроматических полей апертурных антенн, полученные в результате преобразования Фурье от временных зависимостей полей.

В **разделе 1.6** приведено обсуждение ближнего монохроматического

поля круглой апертуры при разных распределениях поля по апертуре. В частности с точки зрения импульсных характеристик апертуры объяснено поведение ближнего монохроматического поля круглой плоской апертуры со спадающими к краям распределениями поля. С временной точки зрения объяснены эффект улучшения равномерности распределения ближнего поля при увеличении скорости падения амплитуды поля к краям апертуры, а также эффект более равномерного распределения поля в непосредственной близости от апертуры.

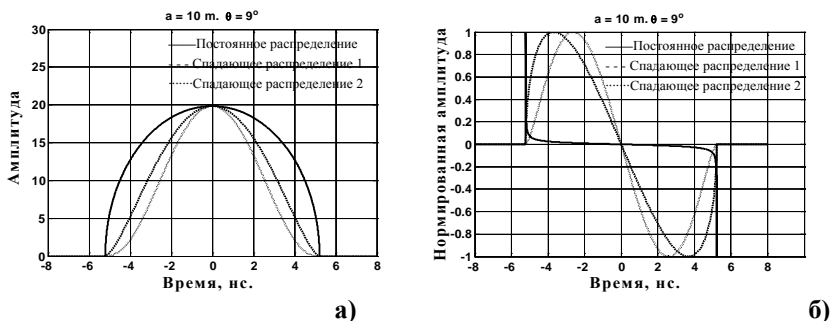


Рис.4. Графики первообразной ИПХ (рис.4.а) и ИПХ (рис.4.б) круглой плоской апертуры в дальней зоне для разных распределений амплитуды поля по апертуре.

Во второй главе приведен расчет импульсных полей прямофокусной и офсетной параболических зеркальных антенн.

В разделе 2.1 дан вывод выражений для векторного ближнего поля параболической зеркальной антенны с дипольным облучателем, излучившим δ - импульс. Считается, что эффективная полоса частот ограничена сверху и снизу, и максимальная длина волны много меньше размеров апертуры, фокального расстояния зеркала и расстояния от зеркала до точки наблюдения.

С учетом этих приближений поле антенны рассчитывается токовым методом в виде интеграла по поверхности зеркала. С использованием техники интегрирования δ - функции сложного аргумента, двумерный интеграл по поверхности в каждый момент времени сводится к одномерному интегралу (см. рис.5).

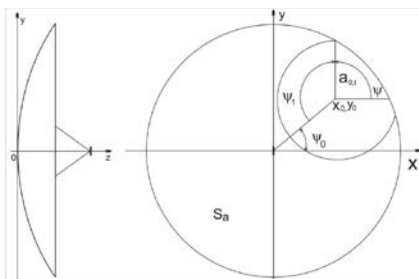


Рис.5. Геометрия задачи для прямофокусной апертурной антенны.

В случае бесконечного фокусного расстояния (случай плоской апертуры):

$$\bar{E}_\delta = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\psi_1+\psi_0}^{\pi-\psi_1+\psi_0} \bar{q}_L d\psi, \text{ где проекции вектора } \bar{q}_L \text{ представляются следующим}$$

$$\text{образом: } \bar{q}_{L,x} = -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right) \sin 2\psi, \quad \bar{q}_{L,y} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right) + \left(1 - \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right) \cos 2\psi\right],$$

$$\bar{q}_{L,z} = -\frac{1}{2} \frac{z_0 \sqrt{(ct')^2 - z_0^2}}{(ct')^2} \sin \psi.$$

При этом основная компонента может быть выражена в элементарных функциях:

$$E_{\delta,y} = \begin{cases} 0, & 0 < ct' < z_0 \quad \rho_0 < a, \quad ct' < l_1 \quad \rho_0 < a, \\ & & & & ct' > l_2; \\ \frac{1}{4\pi} \left(1 + \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right), & l_1 < ct' < l_2 \quad \rho_0 < a; \\ \frac{1}{4\pi} \left[\left(1 + \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right) \psi_1 - \left(1 - \frac{z_0^2}{(ct')^2}\right) \cos 2\psi_0 \sin 2\psi_1 \right], & l_1 < ct' < l_2 \end{cases}$$

Подробное описание используемых в этом разделе переменных l_n, ρ_n, ψ_n и др. приведено в диссертации.

В **разделе 2.2** приведены графики первообразных и ИПХ для всех трех поляризационных компонент. Отмечается, что форма и поведение неосновных поляризационных компонент, второй тангенциальной $E_{\delta,x}$ и радиальной $E_{\delta,z}$ (рис.7) в общем случае отличается от формы и поведения основной поляризационной компоненты (рис.6). Отмечается, что импульс, излученный параболической антенной, более длительный, чем импульс, излученной плоской апертурой. Показано, что временная зависимость поля реальных антенн определяется ИПХ антенны. Отмечается, что для параболической антенны задний фронт первообразной ИПХ более пологий, что приводит к уменьшению амплитуды второго импульса ИПХ. Тем самым, для параболической антенны амплитуда импульса, следующего за основным, значительно меньше, чем для плоской апертуры. Вследствие этого ближнее поле зеркальной антенны на одной частоте имеет более равномерное пространственное распределение, чем поле плоской апертуры с той же формой прожекторного луча. Этот эффект известен из численных расчетов для монохроматического поля (см., например, [1]), однако в рамках импульсной переходной характеристики он объясняется весьма наглядно. Полученные выражения для импульсного переходного поля в ближней зоне оказываются гораздо проще, чем для монохроматического поля, представляемого обычно в виде двумерных

интегралов или разложений по специальным функциям.

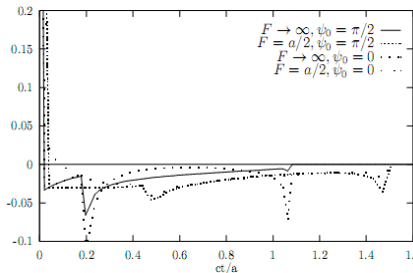


Рис. 6. Основная компонента
 $E_{\delta,y}, \rho_0 = a/2$.

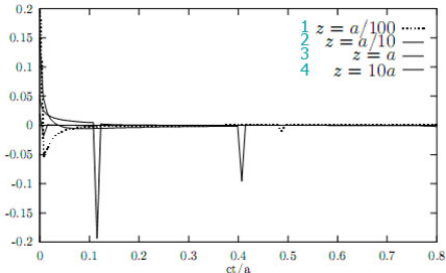


Рис. 7. Поляризационная компонента
 $E_{\delta,z}, \rho_0 = a/2$.



Рис. 8. Положение точек наблюдения для рис. 7.

В **разделе 2.3** получены выражения для временных зависимостей дальнего поля параболической антенны. Показано, что диаграмма направленности параболической зеркальной антенны состоит из двух импульсов разной полярности. При уменьшении угла наблюдения задержка между импульсами уменьшается, а их амплитуда возрастает. Показано, что в дальней зоне при увеличении глубины зеркала длительность откликов незначительно возрастает.

В **разделах 2.4, 2.5** получены аналитические выражения для ближнего электромагнитного поля излучаемого офсетной параболической антенной, в фокусе которой находится элементарный диполь (проекция поверхности рефлектора на апертурную плоскость (x,y) является кругом). Показано, что импульсное поле офсетной рефлекторной антенны отличается от импульсного поля прямофокусной рефлекторной антенны.

В **разделах 2.6, 2.7** получены аналитические выражения для импульсного дальнего поля офсетной рефлекторной антенны. Показано, что временной интервал, в котором импульсное дальнее поле отлично от нуля, значительно меняется по сравнению с симметричной рефлекторной антенной. Кроме этого, в случае офсетной рефлекторной антенны появляется кросс-компонента поля в сечении, перпендикулярном направлению сдвига центра апертуры относительно вершины параболического зеркала.

В **третьей главе** описаны особенности импульсных полей при взаимодействии двух антенн и проведен анализ возможностей прямых измерений диаграммы направленности апертурным зондом.

В **разделе 3.1** обсуждается критерий дальней зоны для линейных антенн.

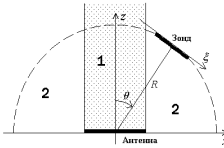


Рис. 9. Геометрия взаимного расположения антенн. 1 – область проекторной зоны, 2 – область боковых лепестков.

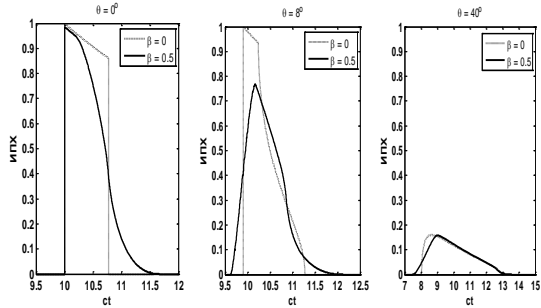


Рис. 10. Первообразные ИПХ для линейного раскрыва (штриховые кривые - точечная приемная антенна, $R=10$, $a=4$, $b=2$).

Геометрия взаимного расположения антенн приведена на рисунке 9. Зондовая антенна движется по касательной к окружности радиуса R , а и b соответственно размеры измеряемой антенны и зонда, $\beta = b/a$. Первообразные ИПХ для линейного и точечного зондов приведены на рисунке 10. Из рисунка видно, что с увеличением размера апертуры зонда длительность ИПХ увеличивается и соответственно амплитуда уменьшается. При определении уровня боковых лепестков имеют место два эффекта: снижение амплитуды сигнала в направлении бокового лепестка и снижение максимального уровня сигнала в направлении оси антенны, на который, нормируется амплитуда в направлении бокового лепестка при определении уровня боковых лепестков. В результате при отношении длин зонда и измеряемой антенны и зонда $\sim 0,4$ погрешности определения коэффициента усиления антенны и уровней боковых лепестков оказываются минимальными.

В **разделе 3.2** приведен анализ требуемого расстояния до дальней зоны и погрешностей определения ДН планарных апертур в случае малого зонда и в случае апертурного зонда, когда размер измеряемой антенны сравним с размером зондовой. Первообразная ИПХ на выходе зонда $E_{z,0b}$

представляется в виде: $E_{z,0b} = \frac{1}{S_b} \iint_{S_b} E_{z,0} d\xi d\eta$, где ξ, η - координаты в плоскости апертуры зонда, S_b - площадь апертуры зонда, $E_{z,0}$ - ИПХ в

точке на поверхности зонда.

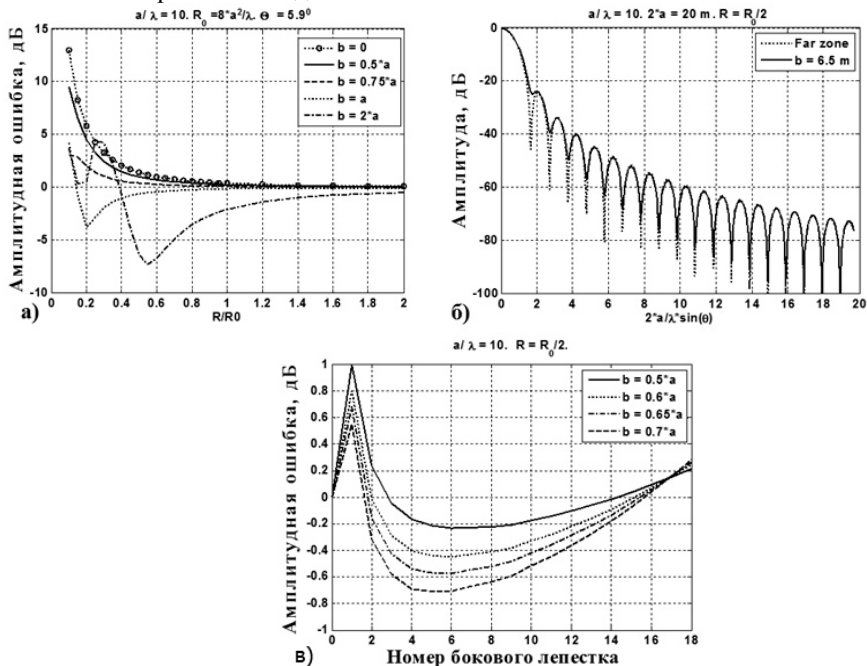


Рис. 11. Зависимости для круглой апертуры с распределением поля $q(\rho_a) = 1 - \rho_a^2/a^2$; а) ошибки уровня 1-го бокового лепестка от расстояния между антеннами; б) ДН измеренные апертурным зондом; в) ошибки максимумов боковых лепестков.

В подразделе 3.2.1 рассматривается круглая плоская апертура, а в подразделе 3.2.2 прямоугольная плоская апертура с равномерными распределениями поля. В подразделе 3.2.3 обсуждаются особенности критерия дальней зоны, в том числе для антенн со спадающими к краям апертуры распределениями поля. На рисунке 11, для круглой апертуры с распределением поля $q(\rho_a) = 1 - \rho_a^2/a^2$, показаны зависимости ошибки уровня 1-го бокового лепестка от расстояния между антеннами (а); ДН измеренные апертурным зондом (б); ошибки максимумов боковых лепестков (в). Здесь ρ_a - расстояние от оси апертуры до текущей точки на апертуре, a - радиус апертуры, λ - длина волны. Видно, что минимальные ошибки уровней боковых лепестков возникают при размере зонда в половину апертуры измеряемой антенны $b = 0,5a$, при этом хорошо известный критерий дальней зоны $R_0 = 2D^2/\lambda$ понижается в два раза.

Отметим, что в случае большого апертурного зонда, обычно используется критерий дальней зоны $R_1 = 2(D_a + D_b)^2 / \lambda$, здесь D_a , D_b - размеры апертур измеряемой и зондовой антенн. Уменьшение критерия R_0 в два раза при $b = 0,5a$ соответствует уменьшению критерия R_1 в 4.5 раза. При этом ошибка измерения уровня боковых лепестков не превышает 1 дБ. Кроме того, показано, что точечный зонд при уменьшении расстояния между антеннами повышает, а апертурный зонд - понижает уровни боковых лепестков.

В четвертой главе приводится метод реконструкции временных зависимостей поля антенны в дальней зоне по временным зависимостям в ближней зоне.

В разделе 4.1 дано теоретическое обоснование и приведены основные соотношения, применяемые для расчета поля в дальней зоне $\bar{f}(t, \bar{k})$ (\bar{k} - единичный вектор, характеризующий угловое направление в дальней зоне) при измерениях временных зависимостей поля в ближней зоне $\bar{E}(t, \bar{r}_s)$ (\bar{r}_s - векторная координата точки на поверхности S). Описан метод расчета, заключающийся в вычислении временной зависимости поля в дальней зоне:

$$\bar{f}(t, \bar{k}) \approx \frac{1}{2\pi c} \frac{d}{dt} \iint_{S_0} \left[\bar{k} \left[\bar{n} \bar{E} \left(t - \frac{1}{c} \bar{r}_s \bar{k}, \bar{r}_s \right) \right] \right] d^2 \bar{r}_s,$$

где \bar{n} - нормаль к поверхности сканирования S , S_0 - область S , в которой выполняется условие $(\bar{n}, \bar{k}) > 0$. Данное соотношение получено на основе интеграла известного соотношения для монохроматических сигналов [12], при этом множитель $\exp i\psi$ (ψ - фаза) заменен на соответствующую временную задержку, множитель $j\omega$ (ω - круговая частота) на операцию дифференцирования по времени.

В разделе 4.2 описаны особенности практической реализации метода для сферической (подраздел 4.2.1) и для плоской (подраздел 4.2.2) поверхностей сканирования. Также приведено описание принципов работы импульсной зондовой антенны (подраздел 4.2.3), экспериментальной установки (подраздел 4.2.4) и результатов экспериментов (подраздел 4.2.5).

В разделе 4.3 приведено сравнение схем вычислений во временной и частотной областях и проведен анализ ошибок измерений во временной области, описаны особенности схемы вычислений в частотной области (подраздел 4.3.1) и схемы вычислений во временной области (подраздел 4.3.2). Также приведена оценка необходимого количества временных точек в ближней зоне (подраздел 4.3.3), проведено сравнение двух схем

вычислений (подраздел 4.3.4) и проведен анализ погрешностей, обусловленных средствами измерения ближнего поля (подраздел 4.3.5).

В разделе 4.4 описаны особенности восстанавливаемого сверхширокополосного импульсного дальнего поля.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен метод расчета полей апертурных антенн во временной области, в рамках которого первообразная импульсной переходной характеристики (ИПХ) антенны как функция наблюдения во многих случаях может быть выражена в элементарных функциях во всем полупространстве перед апертурой. На его основе показаны характерные особенности импульсных полей апертурных антенн разной формы для разных точек наблюдения.
2. Предложенный метод расчета обобщен для спадающих к краям апертуры распределений поля.
3. Предложенный метод расчета обобщен для параболических антенн с учетом поляризации. Показаны особенности основной и кросс-поляризационных компонент импульсных полей зеркальных антенн, а также отличия импульсных полей зеркальных антенн и плоских апертур.
4. Предложен метод расчета результирующей первообразной ИПХ при передаче сигнала между двумя апертурными антеннами. Показано, что для монохроматического сигнала при измерениях диаграммы направленности приемной апертурной антенной на конечном расстоянии, погрешность измерений минимизируется при размере зонда порядка половины размера антенны.
5. Предложен метод реконструкции временных зависимостей поля антенны в дальней зоне по временным зависимостям поля в ближней зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. C. Hansen, Microwave Scanning Antennas - New York and London: Academic Press, 1964. - Vol.1.
2. В.И.Борисов, В.И.Лебедев, С.Н.Переpečко. Введение в оптику ультра коротких лазерных импульсов - Могилев: МГУ им. А.А.Кулешова, 2005. - 328 с.
3. Booker H. G., Klemmow P. C. The concept of an angular spectrum of plane waves. // J. Inst. Elec. Eng. - 1950. - Vol. 97. - P. 11-17.
4. Бененсон Л. С., Фельд Я. Н. Рассеяние электромагнитных волн антеннами (обзор). // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. 33, № 2. - С. 225-246.

5. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. - М. Сов. Радио: -1957. 648с.
6. Е. Г. Зелкин, В. Г. Соколов. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. - М.: Сов. радио, 1980. - 296 с.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. / Пер. с нем. В. И. Тарабрина и Э.В. Лабеецкого. / Под ред. проф. М. П. Долуханова - Л.: Судостроение, 1967. - 517 с.
8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
9. Бахрах Л.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны: теория и методы расчета. - М.: Наука, 1981. - 301 с.
10. Бахрах Л.Д., Курочкин А.П. Голография в микроволновой технике.-М. Советское радио, 1979. - 320 с.
11. Brown J. Theoretical Analysis of Some Errors in Aerial Measurements. // J. Inst. Elec. Eng. - Feb. 1958. - Vol. 105, (part C). P. 343-351.
12. Jull E. V. An investigation of near-field radiation patterns measured with large antennas. // IRE Trans. Antennas Propagat. - 1962. - Vol. AP-10. - P. 363-369.
13. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. / Под ред. Н.М. Цейтлина. - М. : Радио и связь, 1985. - 368 с.
14. Johnson R. C. Antenna Engineering Handbook. - McGraw-Hill Professional, 3 edition, 1992. - 1392 p. ISBN-13: 978-0070323810
15. Yaghjian A.D. An overview of near-field antenna measurements. // IEEE Trans. Antenna Propagat. - 1986. - V. AP-34. - P. 30-45.
16. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Неганов В.А., Соколова Ю.В. Сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения в теории зеркальных и полосковых антенн. — М.: Радиотехника, 2015. — 216 с.
17. Неганов В.А., Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция, электромагнитные волны. — М.: Сайнс-Пресс, 2008, 432 с.
18. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практическое применение антенн. — М.: Радиотехника, 2009. — 720 с.
19. Ключев Д.С., Соколова Ю.В. Электродинамический анализ зеркальных антенн самосогласованным методом // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84. — Вып. 9. — С. 155-158.
20. R. C. Hansen, Measurement distance effects on low sidelobe patterns, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-32, no. 6, pp. 591-594, June 1984.
21. Orefice M., Razaq M.A., Dassano G. (2013). Sidelobe level correction for parabolic antennas radiation pattern measurements in quasi-far-field conditions. In: Electronics letters, vol. 49 n. 23, pp. 1423-1425.
22. T. Uno, S. Adachi, Range distance requirements for large antenna measurements, IEEE Trans, of AP, vol. AP-37, pp. 707-720, June 1989.

23. Baum C. E. Impulse Radiating antennas. // in book U-WB, Short-Pulse Electromagnetics, ed. by Bertroni et al., Plenum Press. - 1993.
24. Горюнова С.В., Дрожилкин С.В., Жаворонков В.Н., Пономарев Д.Н., Семенова Л.Р., Скулкин С.П., Турчин В.И. Вреямпульсный метод измерения характеристик антенн в ближней зоне. // Изв.вузов. Радиофизика. - 1989. - Т. 32, № 1. - С. 73-83.
25. Hansen T.B., Yaghjian A.D. Formulation of time domain planar near-field measurements without probe correction. // Rome Laboratory Technical Report RL-TR-93-210, ADA276380., 1994.
26. Hansen, J.E., Ed., Hald, J., Jensen, F., and Larsen, F.H. Spherical Near-Field Antenna Measurements. // London: Peter Peregrinus. - 1988.
27. Tuan S.-C., Chou H.-T., Lu K.-Y., Analytic Transient Analysis of Radiation from Ellipsoidal Reflector Antennas for Impulse Radiating Antennas Applications // IEEE Trans on AP. - Jan. 2012. - Vol.60, No.1. - P. 328-339.
28. Tuan S.-C, Lu K.-Y., Chou H.-H. An Analytic Solution of Transient Scattering from Perfectly Conducting Ellipsoidal Surfaces Illuminated by an Electromagnetic Plane Wave // IEEE Trans on AP. - Jan. 2012, Vol.60, No.1. – P. 340-350.
29. Chou H.-T., Tuan S.-C. Analytic Analysis of Transient Scattering from a Finite Second-Order Surface Illuminated by an Incident Plane Wave // IEEE Trans on AP. - Sep. 2006. - Vol.54, No.9, - P. 2463-2471.
30. Chou H.-T., Tuan S.-C. Analytic transient analysis of scattering from general PEC hyperbolic surfaces via surface curvature continuation of ellipsoidal surfaces // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters – Apr. 2014. – Vol. 13. - P. 726-729.
31. Chou, H.-T., Tuan S.-C., H.-H. Chou, Transient analysis of scattering from a perfectly conducting parabolic reflector illuminated by a Gaussian beam electromagnetic field // IEEE Trans on AP. - May 2010. - Vol. 58, No.5. – P. - 1711-1719.
32. De Oliveira R., Helier M. Closed-Form Expressions of the Axial Step and Impulse Responses of a Parabolic Reflector Antenna // IEEE Trans. on AP. - April 2007. Vol. 55, No. 4, P. 1030 - 1037.
33. Седин Л.Г. Импульсное излучение антенны (электромагнитный снаряд)// Радиотехника и электроника. - 1991. - Т.36. № 5. - С. 1014-1022.
34. Гутман А.Л. Метод Кирхгофа для расчета импульсных полей // Радиотехника и электроника. - 1997. - Т.42. № 3. - С. 271.
35. Кирьяшкин В.В., Чубинский Н.П. Коллимирование потоков электромагнитных волн сверхширокополосных сигналов вытянутыми апертурами // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. -2002. -№5. -С.35-41.
36. Щучкин Г.Г. Методы анализа и алгоритмы формирования полей в ближней и дальней зонах для зеркальных антенных систем с неоднородной краевой частью при работе с сигналами наносекундной длительности: Дис.

... канд. техн. Наук: 01.04.03. - М.: МИРЭА, 2009. - 130 с.

37. Кошелев В.И., Лю Ш., Петкун А.А. О критериях границ зон сверхширокополосного излучателя с аксиальной симметрией. // Изв. вузов. Физика. 2008. Т. 51. №9. С. 46-50.

38. Туркин В.А. Разработка излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний радиотехнической аппаратуры: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИЭИМ, 2006. - 163 с.

39. A. Taflove and K. R. Umashankar, "Review of FDTD numerical modeling of electromagnetic wave scattering and radar cross-section," invited paper, Proceedings of the IEEE, vol. 77 (Special Issue on Radar Cross-Sections of Complex Objects), pp. 682-699, May 1989

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

A1. Горюнова С.В., Дрожилкин С.В., Жаворонков В.Н., Пономарев Д.Н., Семенова Л.Р., Скулкин С.П., Турчин В.И. Времяимпульсный метод измерения характеристик антенн в ближней зоне. // Изв.вузов. Радиофизика. - 1989. - Т. 32, № 1. - С. 73-83.

A2. Скулкин С.П. Анализ критерия дальней зоны при измерениях больших антенн на основе импульсных характеристик. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1997. - Т. 40, №4. - С. 290-293.

A3. Скулкин С.П., Турчин В.И. Метод измерений параметров антенн во временной области. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1998. - Т. 41, № 5. - С. 614-623.

A4. Скулкин С.П. О некоторых особенностях импульсных полей апертурных антенн. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1999. - Т. 42, № 2. - С. 148-157.

A5. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient field calculation of aperture antennas. // IEEE Trans. on AP. - May 1999. - Vol. 47. - P. 929-932.

A6. Скулкин С.П., Турчин В.И. Импульсное переходное поле зеркальной антенны в ближней зоне. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1999. - Т. 42, № 9. - С. 886-892.

A7. Скулкин С.П. Анализ поля круглой плоской апертуры на основе ее импульсных переходных характеристик. // Радиотехника и электроника. - 1999. - Т. 44, № 12. - С. 1464-1469.

A8. Скулкин С.П. Импульсное поле прямоугольной плоской апертуры. // Изв.вузов. Радиофизика. - 2008, т. LI, № 12, с.1081-1088.

A9. Скулкин С.П., Турчин В.И. Импульсное поле параболической антенны в дальней зоне. // Изв. вузов. Радиофизика. - 2008, т. LI, № 10, с.884-888.

A10. Скулкин С.П., Турчин В.И. Импульсное поле офсетной параболической антенны в дальней зоне. // Антенны. - 2009, № 6. С. 3-7.

A11. Скулкин С.П., Турчин В.И. Расчет импульсного поля офсетной

рефлекторной антенны в ближней зоне. // Антенны. - 2009, № 8. С. 56-59.

A12. Скулкин С.П., Турчин В.И. Особенности точной и приближенной реконструкции структуры плоско-неоднородных сред по отраженным и прошедшим импульсным сигналам. Изв. вузов Радиофизика. 2010. Т.53, L7, С.481-492.

A13. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Турчин В.И. Анализ критерия дальней зоны для больших антенн с использованием их переходных характеристик. // Антенны. 2011. № 2. (165). С. 47-53.

A14. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Импульсное дальнее поле при разных распределениях поля по апертуре антенны. // Антенны. 2011. № 6. С. 35-38.

A15. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Турчин В.И. Особенности прямых измерений диаграмм направленности широкополосных антенн с учетом размеров апертуры измерительной антенны. // Изв. вузов Радиофизика. 2011. т. 54, №11. С. 819-828.

A16. Артеменко А.А., Скулкин С.П. Особенности импульсных полей больших антенн при измерениях методом ближней зоны. // Антенны. 2011. № 12. С. 18-26.

A17. Артеменко А.А., Скулкин С.П. Анализ ближнего монохроматического поля при разных распределениях поля по апертуре антенн // Вестник ННГУ, серия: Радиофизика, № 1 (1). 2012. с. 56–61.

A18. S. P. Skulkin, V. I. Turchin, and N. I. Kascheev, "Range distance requirements for large antenna measurements for linear aperture with uniform field distribution," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 48, P. 87-94, 2016.

Авторские свидетельства

A19. Пономарев Д.М., Турчин В.И., Дрожилкин С.В., Горячев А.В., Жаворонков В.Н., Скулкин С.П. Способ определения диаграммы направленности в диапазоне частот А.с.№1415203 от 02.01.1986.

A20. Пономарев Д.М., Турчин В.И., Горюнова С.В., Горячев А.В., Жаворонков В.Н., Скулкин С.П. Способ определения диаграммы направленности в диапазоне частот А.с.№1429056 от 29.07.1986

Книги и монографии

A21. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient fields of offset reflector. // in book Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. / Ed. By Paul D. Smith and Shane R. Cloude. - Springer US, 2002. - Vol. 5. - P. 371-375. ISBN 0306473380.

A22. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient fields of parabolic reflector antennas. // in book Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5. / Ed. by Carl E. Baum, Lawrence Carin, Alexander P. Stone. - Plenum, 1997. - Vol. 3. - P. 81-87. ISBN 0-306-45593-5.

A23. Skulkin S. P. Transient fields of rectangular aperture antennas. // in book Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. / Ed. by Carl E. Baum, Lawrence Carin, Alexander P. Stone. - Plenum. 1997. - Volume 3. - P. 57-63.

ISBN 0-306-45593-5.

A24. Skulkin S., Turchin V. Radiation of nonsinusoidal waves by aperture antennas. // in book *Electromagnetic Environments and Consequences.* / Ed. by J.-Ch.Bolomey. - Gramat. France, 1994. - P. 1498-1504.

A25. Skulkin S. Time domain antenna measurement technique. // in book *Electromagnetic Environments and Consequences.* / Ed. By J.-Ch.Bolomey. - Gramat. France, 1994. - P. 1492-1497.

Другие статьи и работы по теме диссертации

A26. Скулкин С.П., Турчин В.И. Импульсное поле зеркальной антенны. // Труды всероссийской научно-практической конференции «Космическая радиолокация». 28 июня-1 июля 2010 г., Муром, С.50-54.

A27. Скулкин С.П., Турчин В.И. Особенности точной и приближенной реконструкции параметров плоскостных сред. // Труды III Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром, 28 июня - 1 июля 2010 г., С. 131-136.

A28. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient far-fields of offset reflector antenna. // Proc. of IEEE AP-S/URSI Symposium. Boston. Massachusetts. July 2001. - Vol. 1. - P. 546-549. ISBN 0-7803-7070-8.

A29. Turchin V. I., Skulkin S. P., Sahli H. Investigation of direct and inverse scattering problems for inhomogeneous medium. // Proc. of IEEE AP-S/URSI Symposium. – Boston. Massachusetts. – July 2001. - Vol. 4. - P. 268-272.

A30. Skulkin S. P., Turchin V. I. Time domain far fields of reflector antennas. // Proc. of AP-S/URSI Symposium. - Montreal. Canada. July 1997. - P. 1414-1416. ISBN 0-7803-4178-3.

A31. Skulkin S. P. Near-field scanning in the time domain. // Proc. JINA'96 Conference. - France. Nice. November 1996. - P. 321-327.

A32. Skulkin S. P., Sorpov Yu. E. An analysis of range distance requirements for large antennas by the use of the pulse radiating characteristics of aperture. // Proc. IEEE AP-S/URSI Symposium. - Newport Beach. U.S.A. June 1995. - P. 1758-1761.

A33. Skulkin S. P. An estimation of some parameters of near field antenna measurements by using of transient characteristics. // Proc. ICAP'95 Conference. - The Netherlands. Eindhoven. April 1995. - P. 158-162.

A34. Skulkin S. P. An analysis of aperture antenna near field. // Proc. JINA'94 Conference. - France. Nice. November 1994. - P. 340-343.

A35. Skulkin S. P. Time domain near field antenna measurements. // Proc. EUROEM '94 Symposium. - Bordeaux. France. May 1994. - Part2. - P. 1492-1497.

A36. Skulkin S. P., Turchin V.I. Radiation of nonsinusoidal waves by aperture antennas. // Proc. EUROEM '94 Symposium. - Bordeaux, France, May 1994. - Part2. - P. 1498-1504.

A37. Skulkin S. Time domain near field antenna measurements. // Proc. of

EMC-94 Congress. - Wroclaw, Poland, June 1994. - P. 198-201.

A38. Skulkin S., Turchin V. Transient Fields of Offset-fed Paraboloid. // In Book of Abstracts of 2000 International Conference on High Power & Ultrawideband Short-Pulse Electromagnetics - EUROEM 2000, May 30, 2000 - Jun. 02, 2000. - P. 123.

A39. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient fields of aperture antennas. // Proc. XXVI General Assembly URSI. - Toronto, Canada, August 1999. - P.287.

A40. Skulkin S. P., Kashaev S. M. Properties of polarisation components of transient near-field radiated from a parabolic reflector antenna. // Proc. PIERS'98. - Nantes, France, July 1998. - P.1204.

A41. Skulkin S. P., Sudaev A.V. The time domain analysis of range distance requirements for large antenna measurements. // Proc. XXVth General Assembly URSI. - Lille, France, August 1996. - P. 587.

A42. Skulkin S. P. Near-field measurements in the time domain. // Proc. XXVth General Assembly URSI. - Lille, France, August 1996. - P. 591.

A43. Skulkin S. P. Near-field measurements in the time domain. // Digest CPEM'96 Conference. - Germany, Braunschweig, June 1996. - P. 428.

A44. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient fields of parabolic reflector antennas. // Abstracts AMEREM'96 Conference, Albuquerque, U.S.A., May 1996. - P. 65.

A45. Skulkin S. P. Transient fields of rectangular aperture antennas // Abstracts AMEREM'96 Conference. - Albuquerque, U.S.A., May 1996. - P. 66.

A46. Skulkin S. An analysis of some errors of antenna patterns restored by measurements on near zone plane. // Abstracts CPEM'94 Conference. - Boulder, U.S.A., June 1994. - P. THP-33.

A47. Skulkin S. Directly time domain antenna measurement technique, Precision Electromagnetic Measurements. // 1994 Digest., Conference. - Boulder, U.S.A., June 1994. - P. 469-470. ISBN 0-7803-1984-2.

A48. Skulkin S. P. Time domain antenna measurement technique. // Abstracts EUROEM '94 Symposium. - Bordeaux, France, May 1994, P. THa-09-02.

A49. Skulkin S. P., Turchin V.I. Radiation of nonsinusoidal waves by aperture antennas. // Abstracts EUROEM '94 Symposium. - Bordeaux, France, May 1994. - P. THa-09-04.

A50. Скулкин С., Турчин В. Излучение несинусоидальных волн апертурными антеннами. // Тезисы докладов конференции "Теория и техника антенн". - Москва, 1994. - С. 248-249.

A51. Скулкин С., Турчин В. Метод измерений параметров антенн во временной области. // Тезисы докладов конференции "Теория и техника антенн". - Москва, 1994. С. 417-420.

A52. Скулкин С. Анализ некоторых ошибок диаграмм направленности антенн, восстанавливаемых по измерениям на плоскости в ближней зоне. // Тезисы докладов конференции "Теория и техника антенн. - Москва, 1994. - С. 403-404.

A53. Алешин С.В. , Скулкин С.П. , Турчин В.И. Времяимпульсный метод

измерения характеристик антенн в ближней зоне. // Тезисы докладов всесоюзной научно-технич. конф. "Применение сверхширокополосных сигналов в радиоэлектронике и геофизике. - Красноярск, 1991. - С. 69.

A54. Рубцова М.С., Скулкин С.П. Метод восстановления характеристик зеркальной антенны по ее реакции на видеоимпульс. // Тезисы докладов всесоюзной научно-технич. конф. "Применение сверхширокополосных сигналов в радиоэлектронике и геофизике. Красноярск, 1991. - С. 78.

A55. Скулкин С.П. О возможности построения видеоимпульсной системы ближней локации. // Тезисы докладов всесоюзной научно-технич. конф. "Применение сверхширокополосных сигналов в радиоэлектронике и геофизике. - Красноярск, 1991. - С. 40.

A56. Скулкин С.П., Турчин В.И. Пространственно-временная и пространственно-частотная структуры поля апертурной антенны в ближней зоне. // Тезисы докладов IV Всесоюзн. конф. "Метрологическое обеспечение антенных измерений. - ВНИИРИ, Ереван, 1987. - С. 234.