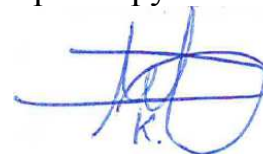


На правах рукописи



**АБУХАДМА ЛАЙТХ КАДИМ ТУРКИ**

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИАГРАММЫ  
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ  
В ОБЛУЧАЮЩЕМ ПОЛЕ, ПРЕДСТАВИМОМ СХОДЯЩИМСЯ  
ПУЧКОМ ПЛОСКИХ ВОЛН**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре Радиоэлектронных и телекоммуникационных систем.

Научный руководитель: **Чони Юрий Иванович**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Радиоэлектронных и телекоммуникационных систем  
КНИТУ-КАИ

Официальные оппоненты: **Маслов Олег Николаевич**,  
действительный член Международной Академии связи,  
доктор технических наук, профессор Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики  
(г. Самара)

**Васин Антон Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва)  
Ведущая организация: АО «Научный центр прикладной электродинамики»  
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 3 июля 2020 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.079.09, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 31/7, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на официальном сайте:

[http://old.kai.ru/science/disser/files/file\\_298/text\\_diss.pdf](http://old.kai.ru/science/disser/files/file_298/text_diss.pdf)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, Ученному секретарю диссертационного совета Д 212.079.09 Денисову Е.С.

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

кандидат технических наук

Денисов Евгений Сергеевич

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## *Актуальность темы.*

Антенна как функциональный элемент радиотехнической системы обеспечивает формирование электромагнитного поля необходимой пространственной структуры в режиме передачи или требуемую угловую чувствительности в режиме приема. Эти важные функции наиболее полно характеризуются диаграммой направленности (ДН) антенны: в общем случае, векторной комплекснозначной функцией угловых координат.

Измерение ДН на этапе разработки или производства антенной техники во многих случаях составляет непростую научно-техническую проблему. Об актуальности исследований по этой тематике свидетельствуют не только поток публикаций, но и недавно защищенные кандидатские и докторские диссертации по проблемам антенных измерений. О востребованности в наши дни соответствующего оборудования свидетельствует успешная деятельность научно-производственной компании «ТРИМ» (г. Санкт-Петербург, сайт [www.trimcom.ru](http://www.trimcom.ru)), фирм Радиолайн (<http://radiorf.ru/>) и Гигапром (<http://www.gigaprom.ru/>), которые специализируются на разработке, производстве и поставке «под ключ» автоматизированных комплексов для измерений характеристик антенн.

Способы измерения ДН антенн составляют три большие группы:

- 1) измерения в дальней зоне, требующие больших помещений или специальных полигонов;
- 2) измерения с использованием коллиматора, технически сложного и громоздкого устройства, создающего в рабочей области облучающее поле в форме участка плоской волны;
- 3) измерения в промежуточной зоне с реконструкцией ДН за счет вторичной обработки данных.

Достоинство третьей группы измерений состоит в том, что они осуществимы в компактных безэховых камерах. Причем современные приборы, векторные анализаторы цепей и сигналов таких фирм, как Rode & Swartz (Германия), Agilent Technologies (США), Микран (РФ), позволяют в автоматическом режиме проводить амплифазометрические измерения и последующую обработку данных по восстановлению ДН. Во многом благодаря доступности этих приборов возрос интерес к работам в этом направлении. Об актуальности темы свидетельствует большое число публикаций по измерениям в промежуточной зоне, вышедших за последние годы.

Реконструкция ДН по результатам измерений в далеко не идеальных условиях, исследованию которых посвящена диссертационная работа, расширяет

возможности измерения ДН в условиях ограниченного пространства и применении радиопоглощающих материалов (РПМ) умеренного качества.

**Целью** работы является повышение точности реконструкции диаграммы направленности при измерениях в промежуточной зоне с использованием поворотных позиционеров.

**Научная задача**, решаемая в диссертации, состоит в разработке средств, обеспечивающих повышение точности реконструкции диаграммы направленности при измерениях в промежуточной зоне.

Для достижения поставленной цели требуется решение ряда взаимосвязанных задач:

- 1) предложить усовершенствованный алгоритм реконструкции диаграммы направленности в рамках методологии сходящегося пучка плоских волн;
- 2) разработать программы имитационного моделирования процессов измерений и вторичной обработки применительно к компактным камерам с несовершенным радиопоглощающим материалом и направленным облучателем;
- 3) исследовать влияние характеристик измерительной установки и параметров алгоритма на результаты реконструкции диаграммы направленности, оценить методическую и шумовую погрешности реконструкции;
- 4) осуществить физический эксперимент по реконструкции диаграммы направленности.

**Объект исследования:** антенны дециметрового диапазона, главным образом, и их диаграммы направленности.

**Предмет исследования:** методы и средства автоматизированного измерения ДН в компактных камерах.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы элементы теории антенн, численные методы электродинамического моделирования, а также экспериментальные методы.

Разработка программных средств осуществлялась с применением сред Delphi 7.0 и MathCad.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

- 1) предложен усовершенствованный способ реконструкции ДН антенны с использованием ее представления в виде разложения по базисным функциям;
- 2) разработаны алгоритмические и программные средства имитационного моделирования процессов измерений и восстановления ДН, получены зависимости точности реконструкции от условий измерения и параметров алгоритма. Предложенный алгоритм исследован на устойчивость, выработаны рекомендации по обеспечению точности восстановления ДН;

3) исследовано влияния неоднородности облучающего поля от недостаточно удаленной протяженной вспомогательной антенны на результаты измерений и восстановления ДН выявлен факт преобладающего влияния «спрямления» фазового фронта облучающего поля над его амплитудной неоднородностью;

4) физический эксперимент применительно к реальной 3D ситуации подтвердил эффективность реконструкции ДН в рамках 2D формулировки: измерения в плоскости и СППВ в той же плоскости.

**Практическая ценность результатов работы** состоит в том, что они позволяют повысить точность реконструкции ДН при измерениях в компактных камерах с весьма умеренным (коэффициент отражения на уровне  $-10\text{дБ}$ ) качеством РПМ. В зависимости от условий измерений снижение среднеквадратической погрешности составляет от 3дБ до 6дБ.

**Реализация результатов работы.** 1. Результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе в Казанском национальном исследовательском техническом университете (КНИТУ-КАИ), что подтверждено соответствующим актом. 2. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» выразило заинтересованность в апробации и дальнейшем использовании разработанных в диссертации программных средств реконструкции ДН, о чем имеется заключение комиссии.

#### ***На защиту выносятся***

1. Усовершенствованный алгоритм реконструкции ДН антенны при измерениях в не идеальных условиях. В частности, в компактной измерительной камере, стенки которой покрыты радиопоглощающим материалом умеренного качества.

2. Программы имитационного моделирования процесса измерений и процедуры восстановления ДН.

3. Оценки методической и шумовой погрешностей реконструкции ДН, подтверждающие повышение точности при использовании предложенного алгоритма.

4. Результаты анализа амплитудного рельефа и фазовой структуры поля, возбуждаемого протяженной вспомогательной антенной-облучателем.

5. Результаты физического эксперимента по реконструкции ДН антенны.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается корректным применением методов теории антенн и электродинамики при расчете ДН и ближнего поля антенны, обоснованностью принятых допущений,

а также результатами имитационного моделирования и физического эксперимента.

**Апробация работы.** Результаты, полученные в ходе выполненных исследований, обсуждались на семи Международных научно-технических конференциях по теории и технике антенн: «2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications» (**Москва**, МТУСИ, 2018г.); XIX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (**Уральск, Казахстан**, 2018г.); МНТК «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», АКТО-2018 (**Казань**, 2018г.); X Всероссийский конкурс молодых ученых (**Челябинская обл., г. Миасс**, 2018г.); XI Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2018» (**Иркутск**, 2018г.); VI МНТК «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2019» (**Казань**, 2019г.); .XXI МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций (ПТиТТ- 2019г.)» (**Казань**, 2019г.). Работа обсуждалась на научных семинарах в КНИТУ-КАИ.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в одиннадцати научных публикациях, в том числе: 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности 05.12.07, статья в издании, включенном в реферативные базы данных WoS и Scopus, 5 докладов на международных и 2 доклада на российских научно-технических конференциях.

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации и публикациях результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. в Автором самостоятельно разработаны программы численного моделирования процессов измерений и реконструкции ДН, разработана методика проведения лабораторного эксперимента. Совместно с соавторами работ [1, 9, 11] выполнены измерения и осуществлена обработка полученных данных по восстановлению ДН испытываемой антенны. Исследования устойчивости предложенного алгоритма реконструкции ДН и анализ методической и шумовой погрешностей выполнены совместно с соавторами публикаций [1 – 5, 7].

#### ***Соответствие диссертации научной специальности.***

Диссертация соответствует специальности 05.12.07 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. Представленные в ней результаты отвечают следующим пунктам паспорта специальности:

– пункту 1 «Решение внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и СВЧ-устройств, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных

путей построения и т. д.» в части исследования свойств электромагнитных полей, представимых сходящимся пучком плоских волн;

– пункту 7 «Исследование и разработка метрологического обеспечения проектирования, производства и эксплуатации антенных систем и СВЧ устройств» в части разработки алгоритмов реконструкции ДН, измеренной в промежуточной зоне.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и Приложений, содержит 113 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 5 таблиц, 76 наименований использованной литературы и 11 наименований работ автора, опубликованных по теме диссертации.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Чони Ю.И. за идеи и ценные советы, а также признательность доценту Лаврушеву В.Н. за помощь в проведении эксперимента.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации, форма апробации и внедрения ее результатов.

**В первой главе**, имеющей обзорный характер, обсуждаются проблемы измерения ДН антенн, сопоставляются различные способы с акцентом на те из них, которые не требуют больших помещений и предназначены, прежде всего, для измерений в компактных безэховых камерах. Использование коллиматоров – специфических устройств, поле излучения которых в пределах рабочей зоны с достаточной точностью соответствует плоской волне – привлекательно тем, что применимы стандартные поворотные стенды, и измеряемый сигнал дает ДН непосредственно. Однако коллиматоры являются громоздкими, довольно сложными и дорогостоящими конструкциями.

Измерение ближнего поля испытуемой антенны в плоскости с последующим его пересчетом в дальнюю зону способствует сокращению размеров измерительной камеры, однако, сложность механизма плоско-параллельного сканирования и трудности с устранением взаимовлияния зонда и испытуемой антенны препятствуют широкому использованию этого метода.

Настоящая работа имеет отношение к способам измерений, которые в отечественной литературе получили название «метод эталонной антенны», а в англоязычной – «test zone field compensation», что точнее отражает существо процедуры реконструкции. Методы этой группы характеризуются тем, что измерения осуществляются в два этапа. Сначала с помощью зонда, диаграмма направ-

ленности которого известна точно, обследуется поле, облучающее рабочую область. Оно, как правило, образовано совокупностью первичной неплоской волны и полей вторичных отражений. Затем результаты этих измерений используются для восстановления ДН испытываемой антенны по результатам ее обследования в тех же условиях.

В основе метода эталонной антенны лежит утверждение о том<sup>1</sup>, что одна и та же циркулянтная матрица  $\langle N \rangle$  связывает как  $M$ -мерный вектор  $F_z$  отсчетов ДН зонда с  $M$ -мерным вектором  $V$  принятых им сигналов ( $F_z = \langle N \rangle V$ ), так и искомый вектор  $F_a$  отсчетов ДН антенны с вектором  $U$  принятых ею сигналов:  $F_a = \langle N \rangle U$ . Необходимость одинаковости размерностей всех векторов (отсчетов ДН и числа точек измерений) ограничивает вариативность процесса реконструкции ДН.

С использованием методологии сходящегося пучка плоских волн (СППВ) метод эталонной антенны был усовершенствован в двух отношениях<sup>2,3</sup>. Во-первых, уточнены условия применимости метода: отсутствие поверхностных волн заменило требование близости ДН зонда и испытываемой антенны. Во-вторых, в интересах устойчивости решения было предложено кратное превышение числа  $M$  отсчетов ДН и принимаемых над числом  $N$  волн СППВ.

В нашей работе метод СППВ получает дальнейшее развитие в том плане, что за счет разложения искомой ДН в ряд по базисным функциям осуществляется сглаживание шумовых погрешностей и снимаются ограничения на число  $M$  отсчетов за исключением естественного условия  $M \geq N$ .

**Во второй главе** излагается и обосновывается предлагаемый алгоритм реконструкции ДН. Методология СППВ базируется на двух обстоятельствах. Во-первых, функция Грина свободного пространства и, следовательно, произвольное поле в любой области вне источников представимы интегральным преобразованием

$$G(x, y, z) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\pm \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2} z - j\beta_x x - j\beta_y y)}{\sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2}} d\beta_x d\beta_y,$$

которое с физической точки зрения есть сплошной телесный пучок плоских волн, разбегающихся от источника. В этом пучке присутствуют однородные

<sup>1</sup> Плохих С.А., Сазонов Д.М., Щербаков В.И. Восстановление диаграмм направленности антенн методом эталонной антенны по амплитуднофазовым измерениям в ближней зоне // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, т. 30. 1987. № 2. С.59 – 64.

<sup>2</sup> Чони Ю.И., Пироженов С.А. Восстановление ДН антенны по результатам измерений в неидеальных условиях. // Известия вузов. Радиоэлектроника, т.35. 1992. №2. С. 43-50.

<sup>3</sup> Данилов И.Ю. Разработка методов и средств контроля элементов антенных систем перспективных космических аппаратов. Канд. дисс. КНИТУ-КАИ. Казань. 2016.

$(\beta_x^2 + \beta_y^2 < k^2)$  и поверхностные  $(\beta_x^2 + \beta_y^2 > k^2)$  волны. Однако, при антенных измерениях неоднородности, способные породить или поддерживать поверхностные волны, значительно удалены от испытываемой антенны. Поэтому в пределах рабочей области поле представимо как СППВ.

Во-вторых, поскольку ДН определяет реакцию антенны на однородную плоскую волну, то сигнал на выходе антенны, облучаемой СППВ, дается интегралом типа свертки, ядром которого служит ДН антенны. Ради простоты изложения, как и в подавляющем большинстве публикаций на эту тему, рассматривается двухмерная скалярная ситуация, когда ДН антенны  $F(\psi)$  измеряется в плоскости, и облучающее ее поле есть СППВ в той же плоскости.

На первом этапе определяются комплексные амплитуды  $\{A_n = A(\varphi_n)\}$  волн пучка, аппроксимирующего облучающее поле. Для этого зонд, индивидуальная ДН которого  $f_3(\psi)$  точно известна, вращают по окружности  $R_0$  и регистрируют принимаемый им сигнал  $V(\alpha)$  в  $M$  точках  $\{\alpha_m\}$

$$V(\alpha_m) = \sum_{n=0}^N A_n f_3(\varphi_n - \alpha_m) \exp(k R_0 \cos(\varphi_n - \alpha_m)). \quad (1)$$

Решая СЛАУ (1) находят пространственный спектр  $\{A_n\}$  СППВ.

На втором этапе вращают испытываемую антенну, измеряют принимаемый ею сигнал  $U(\alpha)$  и восстанавливают ДН антенны  $F_a(\psi)$  в виде разложения  $\sum_k f_k g_k(\psi)$ , решая относительно коэффициентов  $\{f_k\}$  СЛАУ

$$U(\alpha_m) = \sum_{k=0}^K \sum_{n=0}^N A_n f_k g_k(\varphi_n - \alpha_m), \quad (2)$$

куда входит найденный на предыдущем этапе спектр СППВ  $\{A_n\}$ .

Естественно, должны выполняться неравенства  $M \geq N$  и  $M \geq K$ . Кроме того, значения чисел  $N$  волн СППВ и  $K$  используемых базисных функций ограничены снизу условиями точности представления поля в рабочей области и точности аппроксимации ДН антенны, соответственно, а сверху – условием устойчивости СЛАУ (1) и (2). В работе получены следующие оценки диапазона рациональных значений  $N$  и  $K$ , при которых методическая погрешность реконструкции ДН не превышает  $-40$ дБ и исключается плохая обусловленность СЛАУ (1) и (2):

$$\begin{aligned} [6 + 7.27\rho - 0.024\rho^2 + 0.00024\rho^3] \leq N(\rho) \leq [24 + 7.64\rho - \\ - 0.067\rho^2 + 0.0012\rho^3], \\ K(L_a) \geq [2 + 7.15L_a / \lambda]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\rho = 2R/\lambda$ , а квадратные скобки означают целую часть числа. Расстояние  $D$  до вспомогательной антенны (облучателя, для краткости) выбиралось равным  $5R$ . Расчеты подтверждают справедливость соотношений (3) вплоть до  $R = 30\lambda$ .

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма реконструкции ДН.

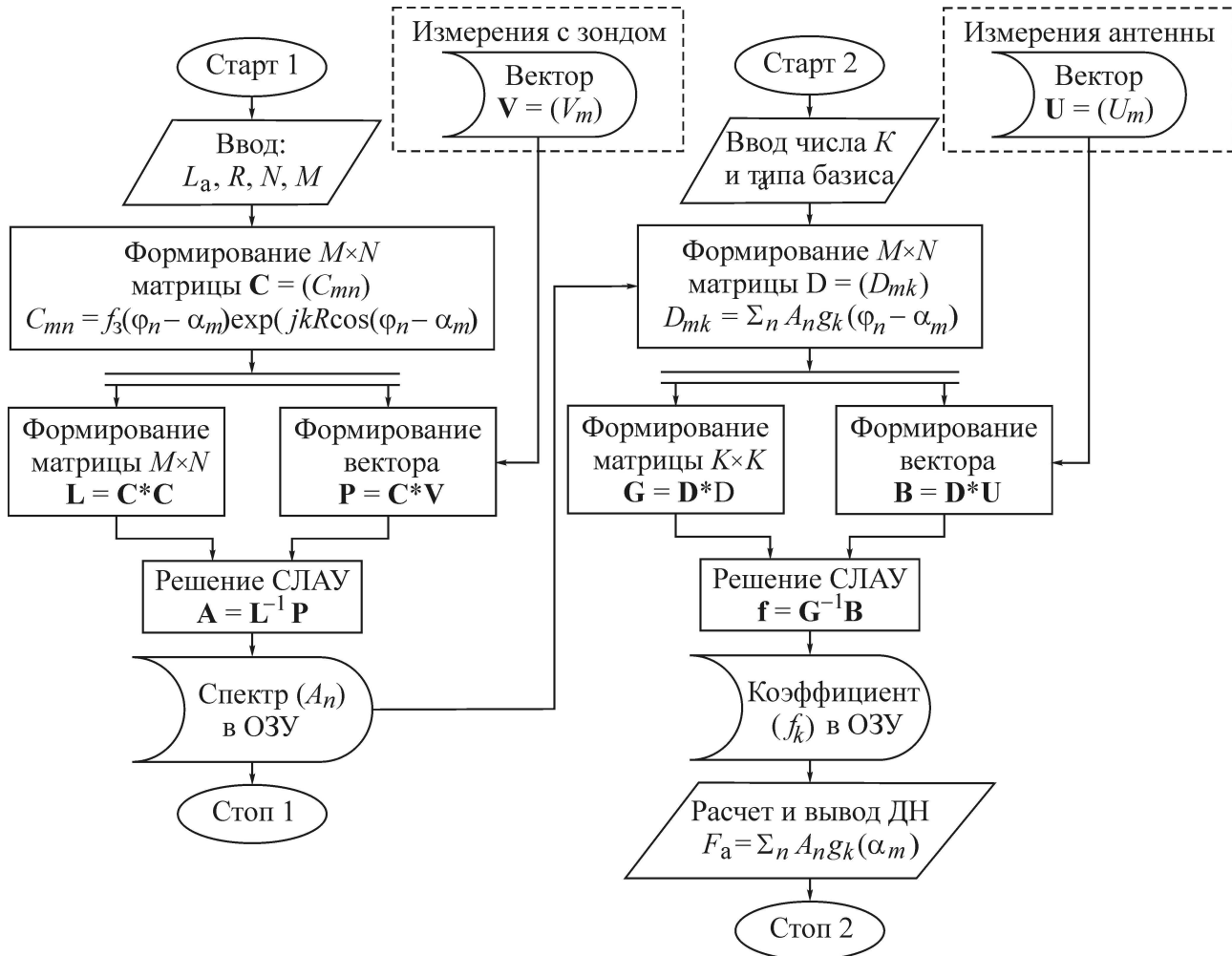


Рис. 1. Блок-схема алгоритма реконструкции ДН

Применение методов реконструкции ДН позволяет ослабить требования и к используемому радиопоглощающему материалу (РПМ) и к коллиматору,

вплоть до замены его рупорным облучателем. При моделировании этапа обследования облучающего поля наличие отражений от стенок учитывалось в рамках метода зеркальных отражений (рис. 2). Поскольку РПМ заметно ослабляет отраженное поле, то многократные отражения не учитывались. Кроме того, задняя стенка практически не облучается, и в рамках двухмерной задачи достаточно в дополнение к первичному источнику  $D_0$ , интенсивность которого принята за единицу ( $I_0 = 1$ ), ввести два фиктивных

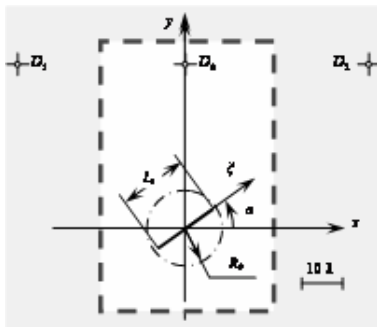


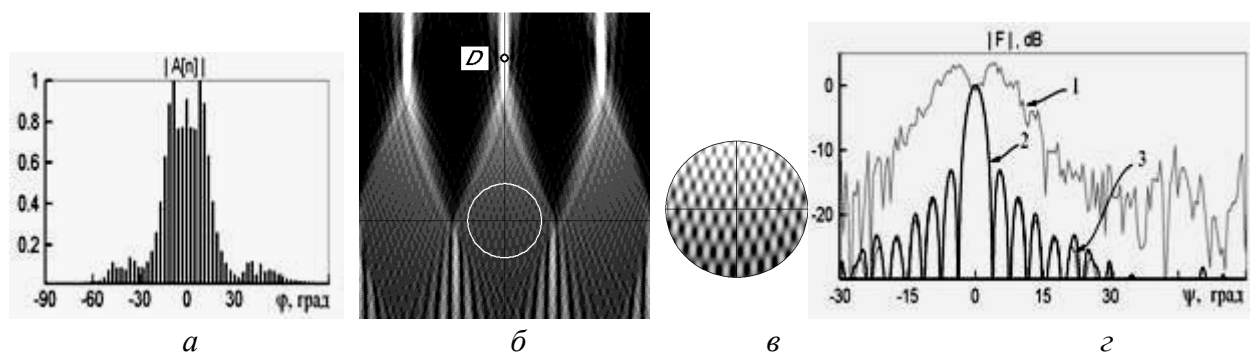
Рис. 2. Модель камеры с несовершенным РПМ

источника  $D_1$  и  $D_2$ , уменьшенной на коэффициент отражения  $q$  интенсивности ( $I = q$ ).

Соответствующие программы имитационного моделирования процессов измерений и обработки данных на этапах вычисления пространственного спектра СППВ и реконструкции ДН были разработаны в средах программирования Delphi 7 и MathCad и представлены в Приложениях к диссертации.

**В главе 3** путем имитационного моделирования при различных сочетаниях геометрических параметров измерительной камеры, качества РПМ и внутренних параметров алгоритма реконструкции (чисел  $M$ ,  $N$ ,  $K$ ) исследуются методическая точность и шумовая погрешность реконструкции ДН как в отсутствии, так и при наличии отражений от стен БЭК. В качестве испытуемой рассматривалась синфазная линейная антенна из элементов с кардиоидными индивидуальными ДН при равномерном амплитудном распределении. Длина  $L_a$  варьировалась в значительных пределах.

На рис. 3 показаны результаты моделирования процессов измерений и реконструкции ДН при размерах  $R = 8\lambda$ ,  $D_0 = 25\lambda$  (рис. 2 соответствуют этим пропорциям),  $L_a = 15\lambda$ , КО РПМ  $q = -20$ дБ. В соответствии с (3) число волн СППВ принималось равным  $N = 130$ . Амплитуды волн пучка  $|A_n|$  на интервале углов  $\pm 90^\circ$  представлены на рис. 3, а. Оттенками серого отображен амплитудный рельеф поля СППВ (рис. 3, б) в пределах пространства  $45\lambda \times 50\lambda$  и в увеличенном масштабе в рабочей области  $S$  (рис. 3, в). Черный цвет соответствует нулевому уровню, белый – максимуму. Естественно, СППВ аппроксимирует облучающее поле только в пределах замкнутой области  $S$ . Интерференция первичного поля и отражений от стенок камеры обуславливает изрезанность (рябь) поля  $|E(x,y)|$ . Точность аппроксимации облучающего поля  $E_0(x,y)$  в  $S$  соответствует значению СКО  $\sigma_E = \|E_0(x,y) - E(x,y)\| / \|E_0(x,y)\| = 0.025$ .



**Рис. 3.** Реконструкция ДН: этап зондирования поля (а, б, в); диаграммы направленности (г)

На рис. 3, г кривая 1 отображает первичные измерения  $|U(\alpha)|$ , т.е. искаженную ДН антенны, а кривые 2 и 3 – восстановленную  $|F_a(\psi)|$  и истинную  $|F_0(\psi)|$  ДН соответственно. СКО реконструкции ДН  $\sigma_F = \|F_0(\psi) - F(\psi)\| / \|F_0(\psi)\|$  составило значение 0.015, в силу чего кривые 2 и 3 практически совпадают.

Измеряемые сигналы  $V(\alpha)$  и  $U(\alpha)$  неизбежно «зашумлены» инструментальными погрешностями и собственно шумом. В работе, путем численного моделирования исследуется зависимость точности реконструкции ДН испытуемой антенны от ее волнового размера  $L_a/\lambda$  при изменявшемся в широких пределах отношении  $\varepsilon$  максимального сигнала к шуму, и следующих соотношениях геометрических параметров  $R = 0.47L_a$ ,  $D = 3R$ . Числа  $N$  и  $K$  соответствовали средним значениям (3). Сопоставлялись результаты для двух алгоритмов реконструкции: алгоритм 1 – восстановление ДН в виде  $M$  отсчетов, алгоритм 2 – предлагаемый алгоритм с разложением по базисным функциям.

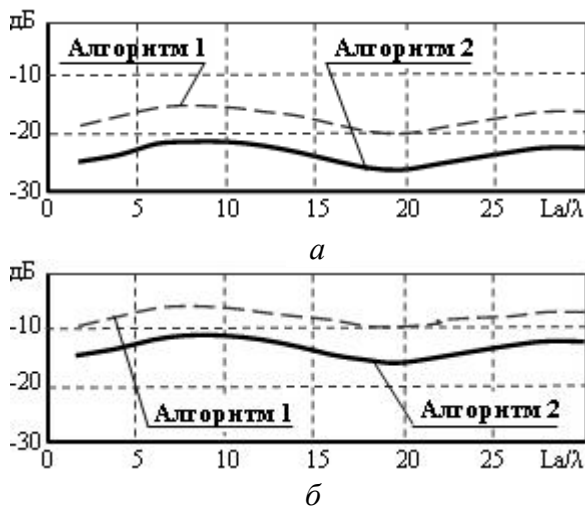


Рис. 4. СКО  $\sigma_F$  реконструкции ДН при шумовой погрешности измерений:  
а –  $\varepsilon = -30$ дБ; б –  $\varepsilon = -20$ дБ

Расчеты показали, что значения  $\sigma_F$  и  $\varepsilon$  в децибелах соотносятся как  $\sigma_F \approx \varepsilon + 10$  [дБ]. Причем, алгоритм 2 обеспечивает выигрыш в точности реконструкции ДН по сравнению с алгоритмом 1. Этот выигрыш возрастает с увеличением числа  $M$  точек отсчетов при фиксированных остальных параметрах и в широком интервале точности измерений  $\varepsilon$  имеет стабильный характер. На рис. 4 представлены зависимости СКО  $\sigma_F$  для двух значений  $\varepsilon$  при  $M = 6N$ . Видно, что СКО  $\sigma_F$ , свойственное алгоритму 1, на 6 дБ хуже того значения, которое обеспечивает алгоритм 2.

Качество РПМ слабо влияет на результат реконструкции ДН, поскольку наличие отражений от стен выявляется на этапе зондирования, проявляясь в пространственном спектре СППВ, и «компенсируется» на этапе решения СЛАУ (2). Расчеты показывают, что при значениях коэффициента отражения  $q$  ниже уровня  $-20$ дБ наличие отражений практически не сказывается на СКО  $\sigma_F$ .

На практике в качестве облучателя используют рупор или иного типа направленный излучатель не только ради повышения уровня полезного сигнала, но для того, чтобы снизить интенсивность поля, отраженного от боковых стен камеры. Однако, с другой стороны, при этом возрастает неравномерность облучающего поля в рабочей зоне, что приводит к дополнительному отклонению первичных данных от истинной ДН антенны.

Чем длиннее раскрыв  $H$  облучателя, тем уже его ДН, и слабее поле на краю антенны. Можно ожидать, что это проявится в расширении измеряемой ДН  $U(\alpha)$ . Результаты моделирования (рис. 5, левая колонка, серые линии)

выявляют обратную зависимость. Объяснение такой противоположной тенденции связано с особенностями поля  $E_0(x,y)$  в рабочей области. В правой колонке представлены зависимости модуля (серый пунктир) и аргумента в радианах (черные линии) для облучающего поля  $E_0(x)|_{y=0}$  на оси  $Ox$ . С увеличением длины  $H$  облучателя неравномерность амплитудного распределения поля  $E_0(x)$  возрастает, но фазовый фронт постепенно спрямляется, что и оказывается превалирующим фактором.

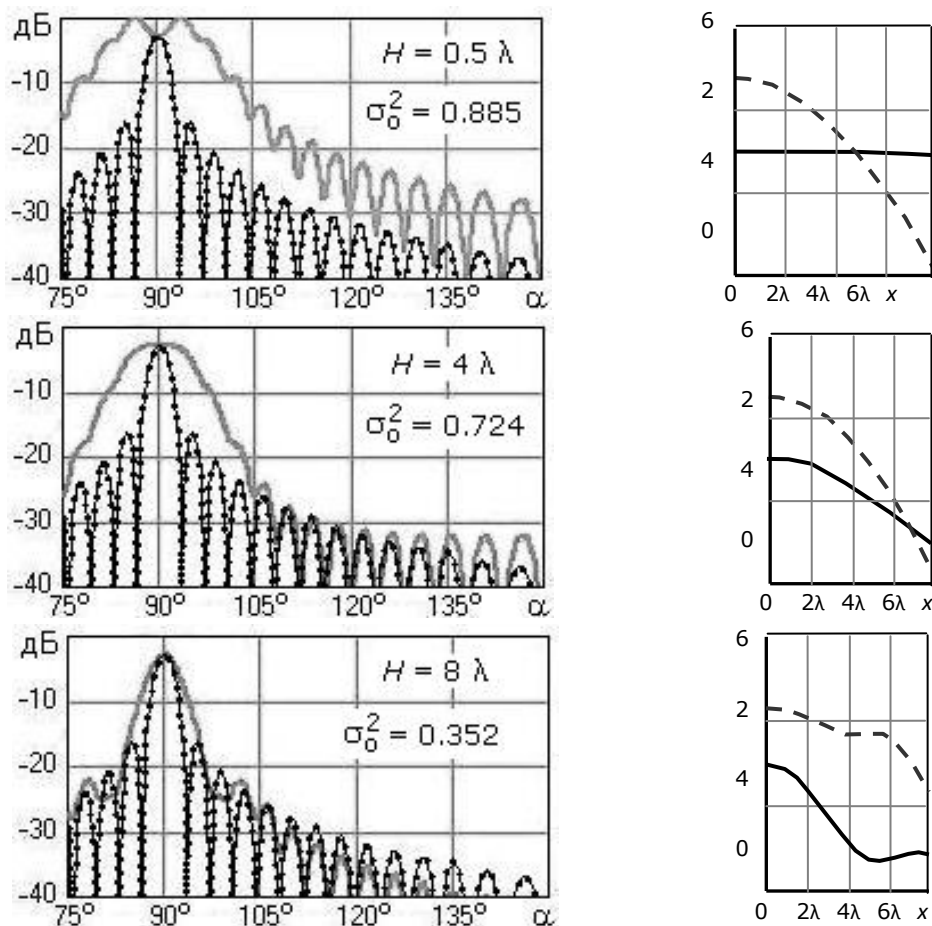


Рис. 5. Левая колонка – измеренные и истинные ДН; правая колонка – поле  $E_0(x)$

**Глава 4** посвящена экспериментальной проверке алгоритма реконструкции. В учебной лаборатории была собрана установка (рис. 6), состоящая из облучателя (открытый конец волновода с фланцем на неподвижной стойке 1); поворотной стойки 2, на которой крепится зонд или испытываемая антенна, листа РПМ 3, портативного векторного анализатора цепей R&S FSH8 и ПК для программной обработки данных. Расстояние  $D$  между стойками составляло 30см, зондом служил открытый конец

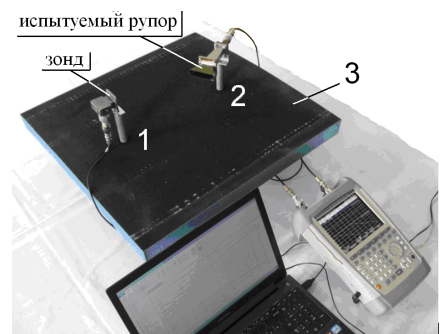


Рис. 6. Состав и внешний вид экспериментальная установка

волновода WG-15 с фланцем, который вращался по окружности радиуса  $R_0 = 14.5\text{см}$ , испытуемой антенной –  $H$ -плоскостной рупор раскрыва  $65 \times 12\text{мм}^2$ , смещенный с оси вращения на  $12.5\text{см}$ . Измерения проводились на частоте  $7\text{ГГц}$ .

На рис. 7 представлены результаты измерений и обработки данных. СППВ состоял из сорока волн ( $N = 40$ ). Пунктиром выделена измеренная ДН  $U(\alpha)$ . При реконструкции ДН  $F_a(\psi)$  вычислялись коэффициенты ее Фурье-разложения не только по двадцати косинусам, но и по двадцати синусам, чтобы учесть ошибки, присутствующие в измерениях, и неидеальность рупора, которые нарушают четность функции  $F_a(\psi)$ . Реконструированная ДН представлена сплошной кривой. Для сравнения измерялась ДН испытуемого рупора при облучении из дальней зоны. Измеренная «истинная» ДН выделена жирной линией. Различие амплитудных ДН  $|U(\alpha)|$  и  $|F_a(\psi)|$  не велико, то фазовые диаграммы (рис. 7,  $z$ ) заметно отличаются.

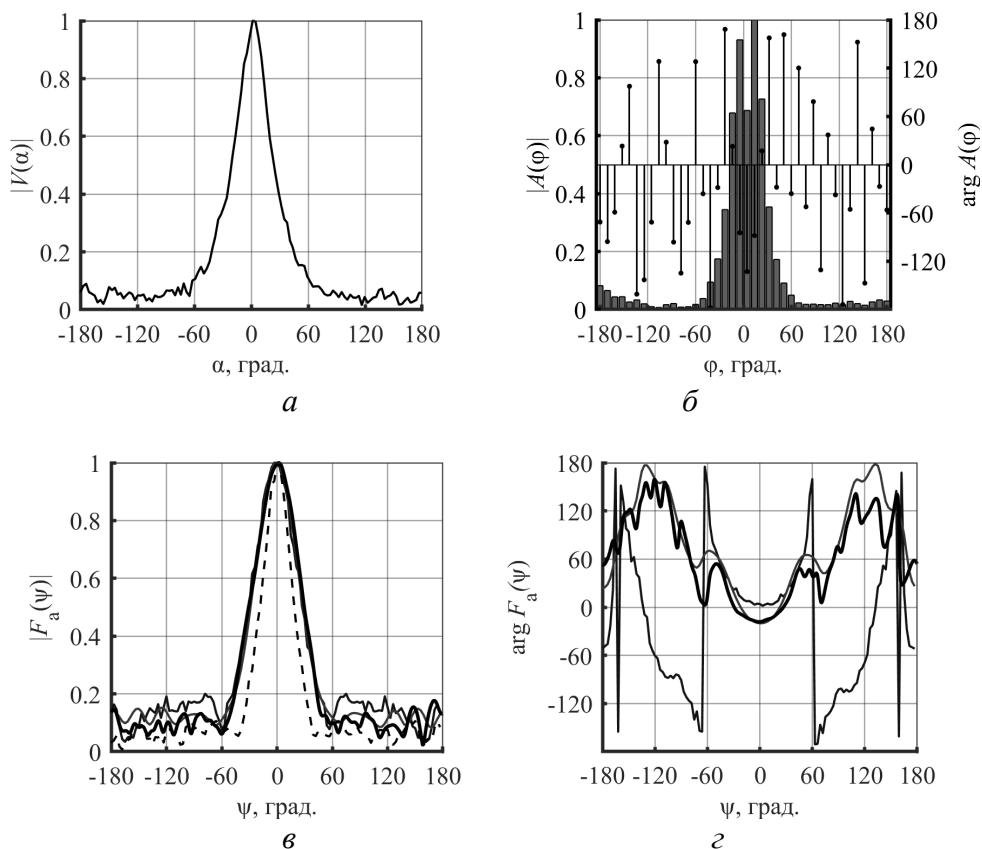


Рис. 7. Этапы зондирования облучающего поля ( $a$ ,  $б$ ) и реконструкции ДН ( $в$ ,  $г$ ):  
 $a$  – сигнал зонда  $|V(\alpha)|$ ;  $б$  – спектр  $\{A_n\}$  СППВ;  $в$  – амплитудные ДН;  $г$  – фазовые ДН

Точность реконструкции ДН по измеренным данным характеризуется снижением квадрата СКО  $\sigma_F^2$  до значения  $0.02$  по сравнению с исходным значением  $0.23$  для первичной ДН  $U(\alpha)$ . Таким образом, результаты эксперимента подтверждают не только состоятельность разработанного алгоритма рекон-

струкции ДН, но и применимость двухмерного подхода (с плоским СППВ) при восстановлении ДН в реальной трехмерной ситуации.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

**В приложении** представлены разработанные в среде Delphi программы моделирования процессов измерения и реконструкции ДН с учетом отражений от стен БЭК и шумовых погрешностей на этапах измерений.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты выполненной работы состоят в следующем.

1. В рамках методологии сходящегося пучка плоских волн предложен алгоритм реконструкции ДН испытываемой антенны в виде непрерывной функции, представленной разложением в конечномерном базисе. Получены выражения для коэффициентов матрицы и свободных членов системы линейных алгебраических уравнений, к решению которой сводится задача реконструкции ДН в подобной постановке.

2. В средах Delphi 7 и MathCad разработаны программы имитационного моделирования процессов измерений и вторичной обработки данных, реализующей предложенный алгоритм. Учитываются условия (геометрия измерительной камеры, качество радиопоглощающего покрытия, характеристики облучателя) и точность измерений, а также регулируемые параметры алгоритма.

3. С использованием этой программы:

Выполнен анализ методической погрешности реконструкции ДН линейных антенн, волновой размер которых изменялся вплоть до  $30\lambda$ . Получены оценки минимально необходимой размерности ряда Фурье, аппроксимирующего ДН антенны, и числа волн пучка, которое снизу ограничено точностью аппроксимации облучающего поля, а сверху – плохой обусловленностью соответствующей задачи.

Применительно к линейной антенне варьированной длины  $L_a$  при удалении облучателя на расстояние  $2.5L_a$  исследована шумовая погрешность реконструкции ДН. Показано, что при целесообразном выборе параметров предложенного алгоритма значение  $\sigma_F$  СКО реконструкции ДН связано с относительной погрешностью  $\varepsilon$  измерений равенством  $\sigma_F = \varepsilon + 10$  дБ, т.е. допустимое значение  $\varepsilon$  СКО шумовых погрешностей измерений как минимум на 10дБ должно быть ниже требуемого значения  $\sigma_F$  СКО реконструкции ДН.

Выявлено, что уменьшение отклонения ДН, измеренной в промежуточной зоне, от истинной ДН при применении направленной вспомогательной антенны-облучателя обусловлено спрямлением фазового фронта облучающего поля, которое оказывается фактором, превалирующим над амплитудной неравномерностью этого поля.

В типичных условиях измерений предлагаемый алгоритм обеспечивает снижение среднеквадратичной ошибки  $\sigma_F$  реконструкции ДН на 6 дБ или на 3 дБ в зависимости от числа отсчетов измеряемых зависимостей. Указанное повышение точности реконструкции имеет место при инструментальной погрешности, изменяющейся в широких пределах.

1. Выполнен физический эксперимент, подтвердивший работоспособность предложенного алгоритма, что вылилось в уменьшении среднеквадратичной ошибки от первичного значения  $\sigma_U = -6.4$  дБ до значения  $\sigma_F = -14$  дБ в результате реконструкции. Эксперимент также подтвердил возможность применения 2D-модели при реконструкции ДН плоской антенны в плоскости ее расположения.

2. Результаты исследования внедрены в учебный процесс на кафедре Радиоэлектронных и телекоммуникационных систем КНИТУ-КАИ по дисциплине «Численные методы моделирования антенн и устройств СВЧ», и использованы в дипломных проектах магистрантов и специалистов. Также, АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» выразило заинтересованность и готовность в апробировании и дальнейшем использовании разработанных в диссертации программных средств реконструкции ДН. Имеются соответствующие акт и заключение.

#### **IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

1. Абухадма Л.К.Т. Физический эксперимент по реконструкции диаграммы направленности антенны в рамках методологии сходящегося пучка плоских волн. / Абухадма Л.К.Т., Дардымов А.В., Лаврушев В.Н., Чони Ю.И. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/11/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.11

2. Абухадма Л.К.Т. Восстановление диаграммы направленности антенны по измерениям при мало удаленном направленном облучателе / Чони Ю.И., Абухадма Л.К.Т. // Антенны. № 8 (262), 2019. С. 36-43

3. Абухадма Л.К.Т. Измерение и реконструкция ДН антенны при направленном облучении с близкого расстояния / Абухадма Л.К.Т., Чони Ю.И. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 4 (44). С. 38-46. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.4.38

##### Публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus

4. Абухадма Л.К.Т. Antenna pattern retrieval from measurements in non-ideal anechoic chamber / Чони Ю.И., Абухадма Л.К.Т., Данилов И.Ю. // Proceedings of

the Conference: 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow/ Russia/ 14-15 March. 2018, pp. 376-382. DOI: 10.1109/SOSG.2018.8350647

Работы, опубликованные в других изданиях

5. Абухадма Л.К.Т. Реконструкция диаграммы направленности антенны по измерениям в неидеальных условиях: модифицированный алгоритм / Абухадма Л.К.Т., Чони Ю.И. // XIX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», 16-18 мая 2018. Уральск, Казахстан. Изд.: КазИИТУ, 2018. С. 200-202 URL: <https://www.psuti.ru/ru/science/sbornik>

6. Абухадма Л.К.Т. Вычислительные аспекты реконструкции диаграммы направленности антенны при измерениях в неидеальных условиях. МНТК «АКТО-2018». 8-10 августа 2018. Казань.

7. Абухадма Л.К.Т. Восстановление диаграммы направленности антенны по измерениям в далеко не идеальных условиях. / Абухадма Л.К.Т., Чони Ю.И. // Материалы X Всероссийского конкурса молодых ученых. 9-11 октября 2018. Миасс Челябинской обл. М.: РАН, 2018. Итоги диссертационных исследований. Т. 1. С. 34-43.

8. Абухадма Л.К.Т. Реконструкция ДН антенн летательных аппаратов при измерениях в камере малых размеров. Сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2018», 13-14 декабря 2018. Иркутск. С. 55-66.

9. Абухадма Л.К.Т. Эксперимент по аттестации алгоритма восстановления ДН / Абухадма Л.К.Т., Дардымов А.В. // Материалы VI МНТК «ПЭФЖС-2019», 18-20 апреля 2019. Казань: Изд. ИП Сагиева А.Р. 2019. С. 60-62.

10. Абухадма Л.К.Т. Измерение ДН антенны при направленном облучении с близкого расстояния. // XII Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (ПТиТТ-2019). Казань. С. 479-480

11. Абухадма Л.К.Т. Лабораторный эксперимент по реконструкции ДН антенны, измеренной на малом расстоянии / Абухадма Л.К.Т., Дардымов А.В., Лаврушев В.Н., Чони Ю.И., XII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (ПТиТТ-2019). Казань. С. 463-464.

---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл.печ.л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ Д 22

---

Издательства КНИТУ-КАИ  
420111, Казань, К.Маркса, 10