

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Անտոնյան Սամվել Վարդանի

**ՄՈՏԱԿԱ ԳՈՏՈՒՄ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ
ԺԱՄԱՆԱԿԸ ՆՎԱԶԵՑՆՈՂ ՄԵԹՈՂԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.12.01 - «Ռադիոտեխնիկա, ռադիոհաճախականային սարքավորումներ,
համակարգեր, տեխնոլոգիաներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Антонян Самвел Варданович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ТЕСТИРОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.12.01 – “Радиотехника, радиочастотные устройства, системы,
технологии”

Ереван 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝	տ.գ.դ. Հովհաննես Ավագի Գոմցյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տ.գ.դ. Վահան Հենրիկի Ավետիսյան տ.գ.թ. Սուրեն Գևորգի Էյրամջյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. հունիսի 27-ին, ժամը 14⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Մեղմագիրն առաքված է 2025թ. մայիսի 27-ին:

046 մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете
Армении

Научный руководитель:	д.т.н. Оганес Авакович Гомциян
Официальные оппоненты:	д.т.н. Ваан Генрихович Аветисян к.т.н. Сурен Геворгович Эйрамджян
Ведущая организация:	Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 27-го июня 2025г. в 14⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 046 – “Радиотехника и электроника”, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 27-го мая 2025 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046, к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время испытания антенн находятся на этапе трансформации, что обусловлено стремительным развитием антенных систем с высокими рабочими частотами и более сложной архитектурой, предназначенных для приложений нового поколения, включая мобильную связь пятого поколения (5G), спутниковую коммуникацию, автомобильные радары, а также перспективные технологии шестого поколения (6G). Этот технологический прогресс существенно повысил требования к методам измерения характеристик антенн, которые теперь должны обеспечивать не только высокую точность, широкий частотный диапазон и чувствительность к поляризации, но и быстрый процесс измерения, повторяемость результатов и стоимостную эффективность. Традиционные методы измерений в дальней зоне постепенно теряют свою актуальность ввиду неспособности соответствовать вышеуказанным требованиям. Их зависимость от экспериментальных установок с большими полигонами, чувствительность к внешним условиям окружающей среды, а также ограниченные возможности масштабирования снижают их применимость в современных научных и производственных условиях, особенно в тех случаях, когда необходимо тестировать антенны значительных электрических размеров. В качестве инновационного и ресурсно рационального подхода всё чаще применяются методы измерений в ближней зоне, которые позволяют с высокой точностью оценивать характеристики антенн в компактных и контролируемых лабораторных условиях.

Методы измерений в ближней зоне, особенно системы с плоской геометрической конфигурацией (англ. Plane Near Field Range — PNFR), представляют собой компактную альтернативу традиционным открытым измерительным системам дальней зоны. PNFR-системы обеспечивают электромагнитную защиту, устойчивость к воздействию окружающей среды и минимальные требования к пространству. Эти преимущества делают их особенно подходящими для использования в производственных линиях, где пространственные ограничения могут отрицательно сказаться на скорости и эффективности измерений.

Одним из ключевых факторов, способствующих применению методов ближнего поля, является устранение ограничения на расстояние в пределах диапазона $2D^2/\lambda$, которое существенно ограничивает применимость дальнего поля для тестирования электрически больших антенн. Напротив, PNFR-системы позволяют тестировать антенны в сравнительно компактных безэховых камерах. Это не только снижает требования к пространству и конструкции установки, но и значительно улучшает воспроизводимость измерений за счёт минимизации влияния переменных факторов окружающей среды, таких как температура, влажность, ветер и радиочастотные помехи.

Основная идея измерений в ближней зоне заключается в том, что в непосредственной близости от антенны фиксируются амплитудные и фазовые компоненты электромагнитного поля, которые затем преобразуются в диаграмму направленности в дальней зоне с использованием математических алгоритмов, таких как модальное разложение на плоские волны, основанное на обратном преобразовании Фурье. Согласно стандарту IEEE Std 149, методы ближнего поля могут обеспечивать высокую точность, особенно при условии применения соответствующих процедур калибровки и преобразования.

Тем не менее, одним из основных ограничений классических PNFR-систем при использовании механически перемещаемого зонда является значительная продолжительность измерений, обусловленная временем, необходимым для

перемещения зонда. Методы, основанные на механическом сканировании, несмотря на то, что обеспечивают высокую точность, зачастую приводят к длительным испытательным процедурам, особенно в тех случаях, когда требуется высокое пространственное разрешение при тестировании антенн с электрически большими апертурами. Увеличенное время тестирования не только отрицательно сказывается на инженерной эффективности, но и приводит к росту общих затрат на измерения, что имеет критическое значение в условиях крупносерийного производства, где необходимо оптимизировать продолжительность тестирования без ущерба для точности и соблюдения стандартов.

Методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы были использованы методы теоретического анализа, математического моделирования, разработки узлов программного обеспечения и реализации прототипа системы.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является исследование, разработка и проектирование широкополосной, высокоэффективной и быстродействующей измерительной системы ближнего поля антенн с многозондовой архитектурой и плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией, предназначенной для измерения антенн с электрически большими апертурами, проведения измерений в лабораторных условиях, а также для решения различных радиотехнических задач.

Для достижения намеченной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- сравнительный анализ методов измерения систем в ближней зоне антенн;
- разработка исследовательской и симуляционной модели измерительной системы ближней зоны антенн с использованием антиподальных антенн Вивальди в качестве измерительных зондов и фазированной антенной решётки-тестируемой антенны;
- проектирование антиподальной антенны Вивальди (ABA) в качестве широкополосного измерительного зонда, разработка её прототипа и получение характеристик;
- моделирование алгоритма одновременного сбора данных и его реализация на векторных приёмопередающих устройствах, предназначенных для регистрации значений электромагнитного поля в ближней зоне;
- разработка многозондовой измерительной системы ближней зоны, создание её прототипа, получение характеристик эталонной антенны с использованием измерительной системы и верификация разработанной системы измерений в ближней зоне антенн.

Научная новизна.

- С целью сокращения времени тестирования антенн в ближней зоне предложена модель измерительной системы ближнего поля с многозондовой структурой, основанной на антиподальной антенне Вивальди и прямоугольной плоской геометрий.
- Антиподальные антенны Вивальди использованы в качестве измерительных зондов в составе измерительной системы, что является компактным и эффективным решением для тестирования антенн в ближней зоне в широком частотном диапазоне.
- Предложен алгоритм для синхронизированного приёма значений

электромагнитного поля в апертуре тестируемой антенны в многозондовой структуре, обеспечивающий синхронизацию работы двух или более векторных приёмопередающих устройств.

- Разработан прототип измерительной системы, позволяющий регистрировать амплитудные и фазовые компоненты электромагнитного поля эталонной рупорной антенны в ближней зоне, расположенной вблизи апертуры, с последующим преобразованием в диаграмму направленности в дальней зоне с использованием алгоритма.

Практическая ценность работы.

Результаты исследования измерительной системы ближней зоны антенн с многозондовой архитектурой и плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией могут быть использованы для сокращения времени измерений в различных радиотехнических системах, а также для уменьшения затратных процессов получения характеристик антенн в условиях производственных линий. В результате исследований, проведённых в рамках данной диссертации, показано, что разработанная измерительная система на основе многозондовой структуры позволяет достичь точности измерений, сопоставимой с существующими дальнеполевыми и компактными измерительными системами, при значительно меньшем времени тестирования.

Кроме того, предложенная измерительная система обеспечивает возможность сокращения времени тестирования при получении характеристик антенн, интегрированных в микросхемы (англ. AiP – Antenna-in-Package), на производственных линиях.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность научных положений обоснована наличием разработанной испытательной системы, её прототипа и соответствующего программного обеспечения. Результаты измерений, проведённых с использованием данной системы, подтверждают работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Применение антиподальных антенн Вивальди позволяет разработать многозондовую измерительную систему ближней зоны антенн, что приводит к значительному сокращению времени тестирования.
2. За счёт широкополосности выбранных зондов расширяется рабочий частотный диапазон разработанной многозондовой измерительной системы.
3. В результате синхронизации векторных приёмопередающих устройств становится возможным одновременный сбор данных о значениях электромагнитного поля.

Публикации. По теме диссертации опубликованы четыре научные работы, одна из которых опубликована в базе данных Scopus, а одна выполнена в индивидуальном авторстве, без соавторов. Полный список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка литературы, включающего 83 наименований. Основной текст работы изложен на 112 страницах, включая 58 рисунков и 1 таблицу. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна, практическое значение полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена общая теория систем тестирования антенн, описана история их развития. Рассматриваются основные методы измерений, составные элементы измерительных систем, анализируются преимущества и недостатки дальнеполевых методов измерений. Описываются существующие на рынке системы тестирования антенн, включая компактные решения, такие как Compact Antenna Test Range (CATR). Также представлен обзор принципов тестирования антенн в ближней зоне.

Тестирование антенн является одним из ключевых этапов оценки эффективности радиочастотных систем, включая системы мобильной связи, радиолокации, спутниковой связи. В последние годы стремительное развитие технологий 5G и 6G привело к ужесточению требований к методам измерений.

В традиционных подходах используются методы измерений в дальней зоне, которые обеспечивают высокую точность, однако требуют больших измерительных площадей, обладают высокой чувствительностью к внешним условиям и не соответствуют современным производственным требованиям.

Как показано на рис. 1, излучение антенны условно разделяется на следующие пространственные зоны:

- Реактивная ближняя зона — расположена непосредственно вблизи антенны. В этой области электрическое (E) и магнитное (H) поля находятся в фазовом сдвиге на 90 градусов друг относительно друга. Следовательно, в данной зоне поля не излучаются (не распространяются), а носят реактивный характер.
- Излучающая ближняя зона (зона Френеля) — следует за реактивной ближней зоной и определяется следующими границами: $0.62 \cdot \sqrt{D^3/\lambda} < r < 2D^2/\lambda$, где D — апертура антенны, λ — длина волны, r — расстояние от антенны.
- Дальняя зона — пространство, где электрическое и магнитное поля находятся в фазовом согласовании и обеспечивают устойчивое излучение. $r > 2D^2/\lambda$.

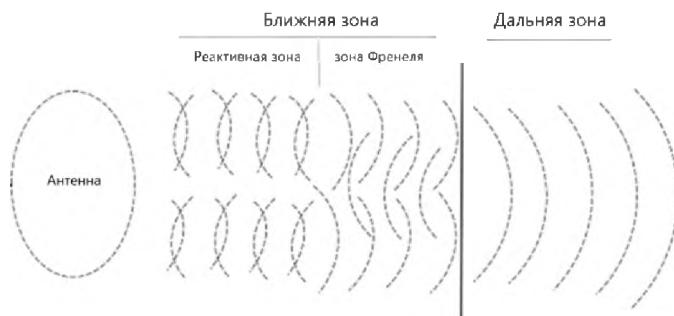


Рис. 1. Зоны излучения антенны

В современной индустрии предлагается ряд систем тестирования антенн, включая:

- компактные измерительные стенды для тестирования антенн (CATR);
- открытые измерительные площадки для дальнеполевых измерений;
- ОТА-системы тестирования в безэховых камерах, включая испытательные камеры для миллиметровых волн 5G.

Подобные системы обладают рядом общих ограничений:

- высокие капитальные и эксплуатационные затраты;
- значительные требования к занимаемой площади;
- чувствительность к условиям окружающей среды;
- продолжительные измерительные процедуры.

Одной из систем с наименьшим временем тестирования, представленных на рынке, является ОТА-система тестирования антенн компании NI (рис. 2).

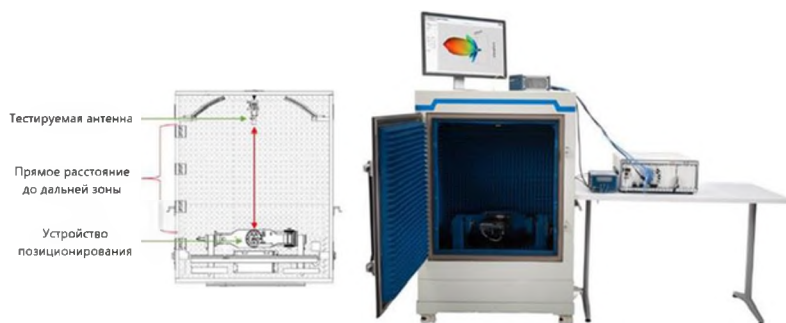


Рис. 2. ОТА-система тестирования антенн миллиметрового диапазона 5G компании NI

В таблице приведено время тестирования антенн с использованием подобной системы при различных расчётных условиях.

Табл. 1. Время тестирования в системе измерения антенн NI OTA

Количество измерений (расчётных точек)	Общее время измерения при сканировании (с)
6000	1000
800	133
200	33

Несмотря на приведённые значения, существенное влияние на общее время тестирования в подобных системах оказывает время перемещения измерительного зонда, что в условиях производственного тестирования приводит к увеличению себестоимости тестируемой антенны. Предлагаемая многозондовая измерительная система позволяет устранить необходимость механического перемещения зонда, что существенно сокращает время тестирования и, как следствие, снижает стоимость тестируемой антенны.

Во второй главе рассматриваются три основные геометрические конфигурации систем тестирования антенн в ближней зоне — цилиндрическая, сферическая и плоская. Обсуждаются их особенности и принципы построения (рис. 3).

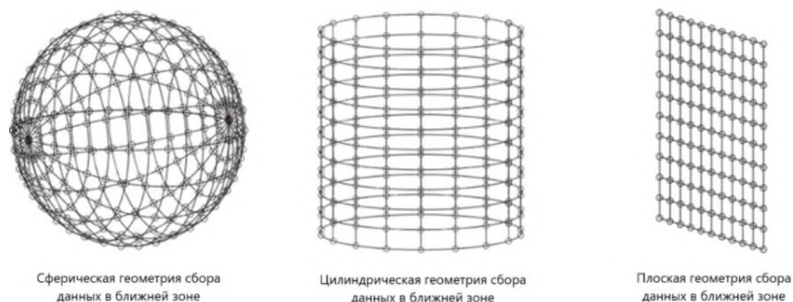


Рис. 3. Геометрические конфигурации сбора данных в ближней зоне

Во всех случаях сбор векторных данных ближней зоны осуществляется посредством размещения зонда в определённой позиции, где электрическое поле, существующее вокруг зонда, генерирует измеримый индуцированный ток. Разность потенциалов между зондом и точкой возбуждения регистрируется с учётом как фазовой, так и амплитудной составляющих.

В рамках диссертационной работы рассматриваются исключительно геометрические конфигурации плоских измерений ближней зоны (PNFR), которые можно классифицировать на три основные подгруппы: плоская дипольная, плоская полярная и плоская прямоугольная. Указанные конфигурации измерений представлены на рис. 4.



Рис. 4. Геометрические конфигурации плоских измерений в ближней зоне

Основным требованием для любой системы плоских измерений в ближней зоне является то, что измерения должны осуществляться на определённой плоской поверхности, на которую проецируются излучаемые электромагнитные поля тестируемой антенны. Расположение выборок измерений зависит от конфигурации роботизированной механической системы позиционирования, используемой для сбора данных.

Наиболее распространённым методом является плоская прямоугольная техника, при которой зонд перемещается вдоль плоскости по декартовой системе координат. При

этом полученные измерительные точки формируют прямоугольную сетку и непосредственно используются для преобразования ближней зоны в дальнюю (NF–FF), которое всегда реализуется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT).

Системы плоских измерений ближнего поля в основном работают по принципу равномерной дискретизации амплитудных и фазовых значений распространяющегося сигнала на плоской поверхности, образующей равномерную сетку. Эта поверхность, как правило, прикасается к плоскости апертуры антенны и располагается на расстоянии в несколько длин волн от неё, как показано на рис. 5.

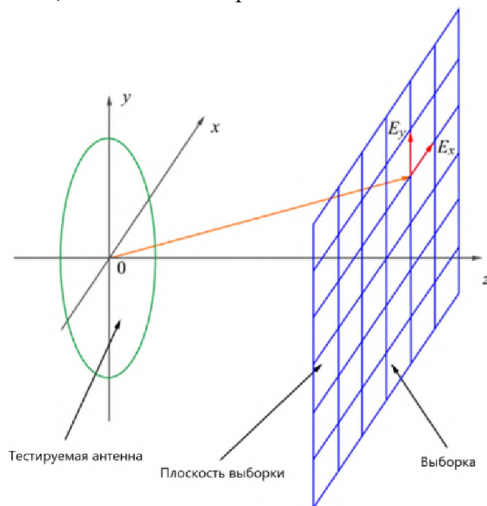


Рис. 5. Система сбора данных в ближней зоне с плоской прямоугольной конфигурацией

Одним из существенных недостатков данной измерительной системы является необходимость механического сканирования зонда по плоскости дискретизации в форме сетки, что значительно увеличивает общее время проведения измерений.

Для одновременного сбора измерений в ближней зоне с плоской прямоугольной геометрической конфигурацией необходимым условием является наличие системы синхронизированных приёмных устройств, обеспечивающей регистрацию амплитудных и фазовых распределений электрического и магнитного полей (E и H) в апертуре тестируемой антенны без временных рассогласований. Метод основан на использовании векторных приёмопередающих устройств (VST). В рамках диссертационной работы рассматривается синхронизация двух таких устройств для синхронного сбора характеристик E и H полей в зоне апертуры.

Синхронизация двух сигналов реализуется по принципу “ведущий-ведомый” (англ. master-slave). Выходные сигналы гетеродина и тактового генератора разделяются между ведущим и ведомым VST устройствами для генерации синхронизированных сигналов. Благодаря системе фазовой автоподстройки частоты, распределение выходной мощности общего тактового генератора позволяет обеспечить синхронную передачу и приём сигналов с нескольких приёмопередающих устройств (рис. 6).



Рис. 6. Блок-схема системы

В качестве источника синхронизированных сигналов были использованы векторные приёмопередающие устройства NI PXIe-5841, излучающие несущую частоту 4,4 ГГц. В результате преобразования передатчик генерировал радиоимпульсы на частотах $4,4 - 0,2 = 4,2$ ГГц и $4,4 + 0,2 = 4,6$ ГГц с мощностью -20 дБм. В данном случае необходимо обеспечить синхронизацию излучения радиоимпульсов, а также режим синхронной передачи радиочастотных сигналов.

На рис. 7 представлена гистограмма фазовых отклонений, полученная в результате проведённого эксперимента. Измерения выполнялись в течение одного часа непрерывной передачи. Из приведённых данных видно, что уровень фазовой синхронизации составляет приблизительно $0,05^\circ$.

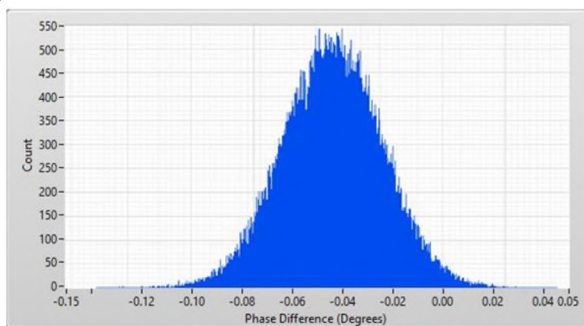


Рис. 7. Фазовая разность между векторными приёмопередающими устройствами

В третьей главе Дается описание измерительной системы, осуществляется разработка её прототипа, а также рассматриваются вопросы выбора необходимых устройств и их технических характеристик. В работе представлена тестируемая антенна, предназначенная для проверки измерительной системы, изложены её конструктивные особенности, а также описан разработанный математический алгоритм обработки данных, реализованный в среде MATLAB.

Проводится проверка подлинности измерительной системы сначала в моделирующей среде, а затем — на основе физического прототипа. В рамках моделирования осуществляется сравнение между диаграммами направленности,

полученными путём преобразования данных, собранных зондами, и диаграммами, рассчитанными на основе идеальных данных, с целью подтверждения точности модели многозондовой измерительной системы. Аналогичное исследование проводится и для реального прототипа, в данном случае — путем сравнения его с техпаспортными данными тестируемой антенны.

Стандартный подход к измерениям в ближней зоне с плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией (PNFR) включает использование открытых волноводов (англ. open-ended waveguides — OEW), поскольку они обеспечивают достаточно однородное усиление в широком частотном диапазоне. Тем не менее, проектирование OEW для работы в высокочастотных диапазонах может быть затруднено из-за необходимости уменьшения физических размеров, чтобы удовлетворить условие дискретизации $\lambda/2$. Одним из возможных решений данной проблемы является применение антенн, размещённых на диэлектрических подложках, которые в настоящее время приобретают большую популярность. Основным преимуществом такого подхода является возможность уменьшения габаритов антенны за счёт диэлектрического коэффициента материала подложки (ϵ_r).

С другой стороны, одним из ключевых требований к PNFR-измерительной системе является наличие широкополосности, обеспечивающей охват широкого частотного диапазона. Для удовлетворения всех перечисленных требований в данной работе были спроектированы зонды ближней зоны на основе антиподальных антенн Вивальди, обладающие линейной поляризацией, широкополосностью и высоким коэффициентом усиления. Размеры таких антенн сравнительно малы благодаря использованию диэлектрической подложки, что делает их легко интегрируемыми в сетку дискретизации PNFR-системы. Кроме того, антенны АВА характеризуются низкими потерями на отражение и минимальными искажениями сигнала.

Базовая структура антенны Вивальди включает в себя фидерную линию (обычно микрополоскового или полоскового типа) и излучающие криволинейные элементы. В различных конструкциях антенны Вивальди применяются различные типы излучающих структур, из которых наибольшее распространение получила экспоненциальная форма, обеспечивающая наиболее широкополосное частотное поведение.

Конструкция антиподальной антенны Вивальди представлена на рис. 8. Она состоит из двух основных частей: фидерной линии и излучающих криволинейных элементов.

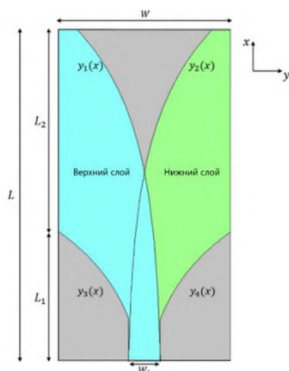


Рис. 8. Конструкция антиподальной антенны Вивальди

Уравнение для такой экспоненциальной кривой неисправности имеет следующий вид:

$$y(x) = \pm(C_1 e^x + C_2), \quad (1)$$

где постоянные C_1 и C_2 задаются следующим образом:

$$C_1 = \frac{y_2(x) - y_1(x)}{e^{ax_2} - e^{ax_1}}, \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{y_1(x)e^{ax_2} - y_2(x)e^{ax_1}}{e^{ax_2} - e^{ax_1}}, \quad (3)$$

Здесь C_1 и C_2 — постоянные; a — коэффициент роста экспоненциальной кривой; (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — начальные и конечные координаты экспоненциальной кривой.

Начальная и конечная точки экспоненциальной кривой задаются следующим образом:

$$\begin{cases} y_1(x) \rightarrow x_1 = 0, x_2 = L, y_1 = -\frac{W_f}{2}, y_2 = \frac{W}{2}, \\ y_2(x) \rightarrow x_1 = 0, x_2 = L, y_1 = \frac{W_f}{2}, y_2 = -\frac{W}{2}, \\ y_3(x) \rightarrow x_1 = 0, x_2 = L_1, y_1 = \frac{W_f}{2}, y_2 = \frac{W}{2}, \\ y_4(x) \rightarrow x_1 = 0, x_2 = L_1, y_1 = -\frac{W_f}{2}, y_2 = \frac{W}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

С учётом минимальной рабочей частоты антенны (f_{min}), толщины диэлектрической подложки (h), диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и длины конструкции антенны (L) расчёты выполняются по формуле

$$L = \frac{c}{2f_{min} \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (5)$$

где:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right). \quad (6)$$

АВА спроектирована для минимальной рабочей частоты $f_{min} = 10$ ГГц, на диэлектрической подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,6$ и толщиной $h = 10^{-3}$ м. Согласно формуле (4), конструктивные параметры антенны АВА составляют: ширина $W = 0,0125$ м, длина $L = 0,024$ м, ширина фидерной линии $W_f = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует входному сопротивлению линии в 50 Ом.

Коэффициенты уравнения (4) были получены в процессе моделирования в результате оптимизации характеристик отражения и излучения. В итоге, конечная точка кривых $y_3(x)$ и $y_4(x)$ составляет $L_1 = 9,3 \cdot 10^{-3}$ м, а уравнения верхней и нижней экспоненциальных кривых имеют следующий вид:

$$\begin{cases} y_1(x) = 17 \cdot 10^{-5} e^{150x} - 17 \cdot 10^{-5}, \\ y_2(x) = -(17 \cdot 10^{-5} e^{150x} - 17 \cdot 10^{-5}), \\ y_3(x) = -(2 \cdot 10^{-3} e^{200x} + 0,3 \cdot 10^{-3}), \\ y_4(x) = 2 \cdot 10^{-3} e^{200x} + 0,3 \cdot 10^{-3}. \end{cases} \quad (7)$$

Как показано на рис. 9, ширина диаграммы излучения в плоскости θ составляет $2\theta_{0,5} = 104,23^\circ$, а коэффициент усиления антенны относительно изотропного излучателя составляет 4,104 дБи.

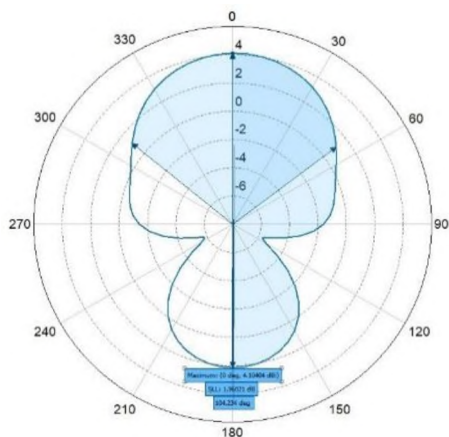


Рис. 9. Диаграмма направленности разработанного антиподального зонда антенны Вивальди в плоскости θ при частоте 10 ГГц

Параметры рассеяния S антенны были измерены с использованием векторного анализатора цепей National Instruments PXIe-5633. Благодаря своим широкополосным характеристикам антенна может быть использована в полном диапазоне частот от 9 до 11 ГГц. При частоте 10 ГГц коэффициент отражения составляет приблизительно $S_{11} \approx -24$ дБ, что соответствует коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН), равному 1,04.

На рис. 10 представлена блок-схема многозондовой системы измерений в ближней зоне антенн с плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией. Система включает в себя шасси National Instruments PXIe-1095, оснащённое векторным приёмопередающим устройством PXIe-5842.

Устройство PXIe-5842 работает в частотном диапазоне от 30 до 26,5 ГГц и обладает функциями векторного анализатора цепей, что делает его особенно удобным для проведения измерений S -параметров в ближней зоне. Дополнительно, компактные габариты прибора способствуют упрощению и миниатюризации всей измерительной системы.

В ходе испытаний измерения S_{21} для каждого зонда осуществлялись последовательно с использованием мультиплексора PXI-2596 типа 6x1.

При использовании векторного приёмопередающего устройства PXIe-5842, время измерения S -параметров составляет 5 миллисекунд на одну точку, а время переключения мультиплексора PXI-2596 — 10 миллисекунд.

Если принять, что для построения диаграммы направленности антенны необходимо выполнить 200 измерений, как это указано для системы OTA от National Instruments (при общем времени измерения 33 секунды), тогда общее время тестирования в предложенной многозондовой системе можно рассчитать следующим образом:

$$T = N_{\text{выборок}} * (t_{VST} + t_{Mux}) = 200 * (5 + 10) \text{мс} = 3 \text{ с.} \quad (8)$$

В результате время тестирования сокращается в 11 раз.

Следует отметить, что при синхронизации двух или более (N_{VST}) устройств VST

общее время измерения тестируемой антенны будет уменьшаться обратно пропорционально количеству синхронизированных устройств, т. е.:

$$T = \frac{N_{\text{выборок}} * (t_{VST} + t_{\text{Мих}})}{N_{VST}}, \quad (9)$$

где $N_{VST} = 1, 2, \dots$

Использование нескольких устройств VST позволяет реализовать полностью синхронизированные и одновременные измерения с применением методов синхронизации, описанных в предыдущих исследованиях.

Для минимизации влияния внешних помех на измерительную систему была использована экранированная камера, обеспечивающая изоляцию до 90 дБ.

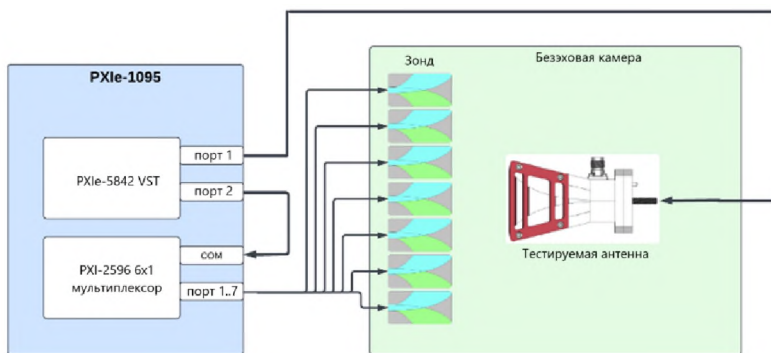


Рис. 10. Блок-схема разработанной измерительной системы

В рамках данного исследования в качестве тестируемой антенны использовалась рупорная антенна DRH50, произведённая компанией RFSpin (рис. 11). Данная антенна была выбрана благодаря своей широкополосной работе и низкому КСВН.

В частности, при частоте 10 ГГц коэффициент отражения соответствует КСВН=1,05, что подтверждает её пригодность для проведения высокоточных и надёжных измерений.



Рис. 11. Тестируемая рупорная антенна для проверки подлинности измерительной системы

Полный вид реализованной системы измерений показан на рис. 12.

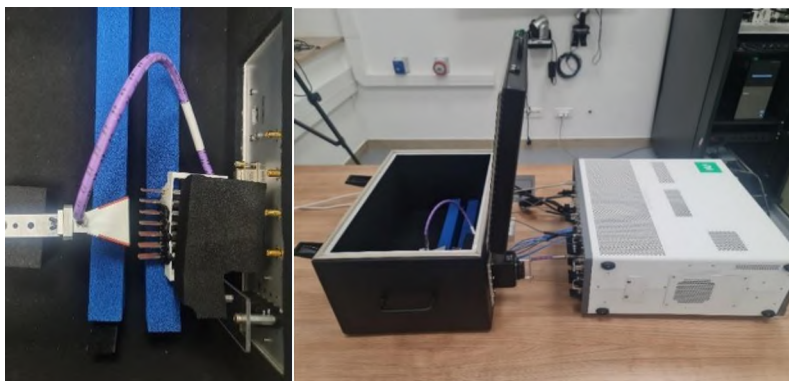


Рис. 12. Вид тестовой системы с антеннами АВА в качестве зондов

Программная среда MATLAB используется для восстановления диаграммы направленности излучения в дальней зоне на основе измерений, выполненных в ближней зоне антенны, посредством преобразования NF-FF (англ. Near-Field to Far-Field).

Модель многозондовой системы была реализована в среде моделирования FEKO. Как показано на рис. 13, для построения симуляционной модели измерительной системы ближней зоны использовались 17 зондов на основе антенн Вивальди. Расстояние между зондами составляет 3,75 мм, что удовлетворяет требованиям дискретизации, поскольку половина длины волны рабочей частоты тестируемой антенны составляет $\lambda_{op}/2 = 14.98$ мм, что значительно больше 3,75 мм.

Тестируемая антенна размещена в центре системы в позиции $X = 0$ для регистрации значений электрического поля в направлении максимального излучения.

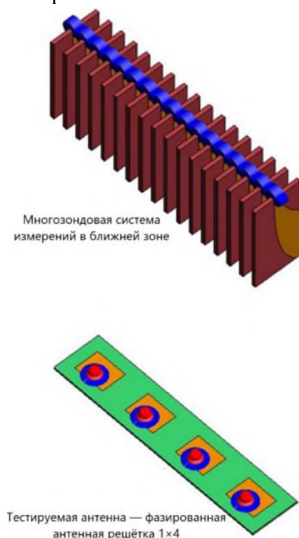


Рис. 13. Модель системы измерений антенны в ближней зоне с АВА-зондами в среде FEKO

Расстояние между тестируемой антенной и самым удалённым зондом составляет 87,47 мм, что удовлетворяет требованиям к дальности излучающей ближней зоны.

Для получения X- и Y- компонент поляризации электрического поля тестируемая антенна была повернута на 90 градусов.

Собранные данные по электрическому полю E представлены на рис. 14.

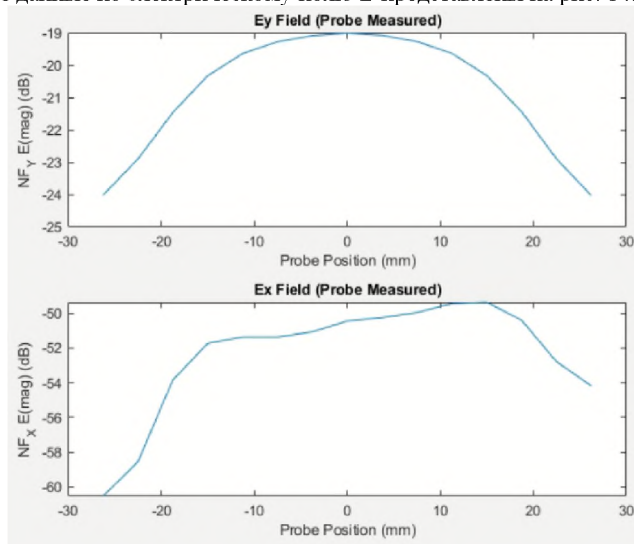


Рис. 14. Измеренные X- и Y-компоненты напряжённости электрического поля E

С целью повышения разрешения изображения дальней зоны были добавлены искусственные точки дискретизации (с нулевыми значениями) по краям распределения ближней зоны. Этот метод позволяет увеличить количество выборок без изменения шага исходной измерительной сетки, при этом границы волновых чисел остаются неизменными.

Дополненные компоненты спектра волн находятся внутри первоначальных границ, что в итоге приводит к получению изображения дальней зоны с высоким разрешением.

В среде MATLAB спектры плоских волн (PWS) рассчитывались с использованием метода добавления искусственных точек и сплайн-интерполяции.

Восстановленное изображение дальней зоны для смоделированной 1×4 антенной решётки представлено на рис. 15. Как видно, ширина диаграммы направленности в плоскости θ составляет приблизительно $2\theta_{0,5} = 25,55^\circ$.

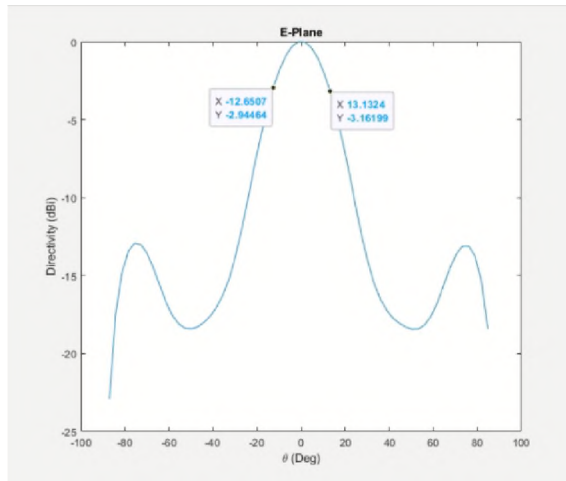


Рис. 15. Симуляция восстановленной диаграммы направленности в плоскости θ

Вышеуказанные действия были повторены с использованием 51 идеально дискретизированной точки, данные по которым были проанализированы в электромагнитной среде моделирования FEKO.

Двумерный график проанализированного идеального электрического поля представлен на рис. 16.

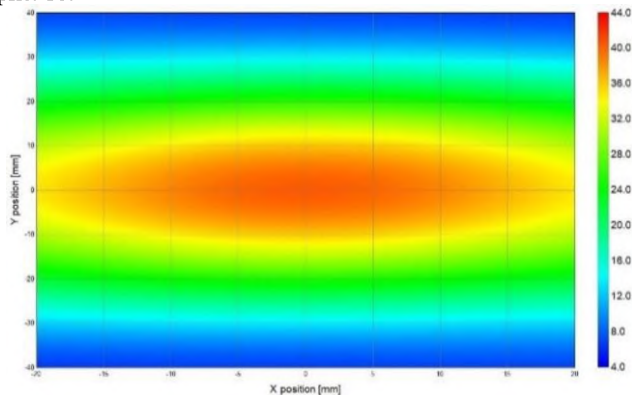


Рис. 16. Двумерный график напряжённости идеального электрического поля E в ближней зоне тестируемой антенны в среде FEKO

В результате модального разложения по плоским волнам диаграмма направленности тестируемой антенны, восстановленная на основе идеальных данных, в дальней зоне представлена на рис. 17.

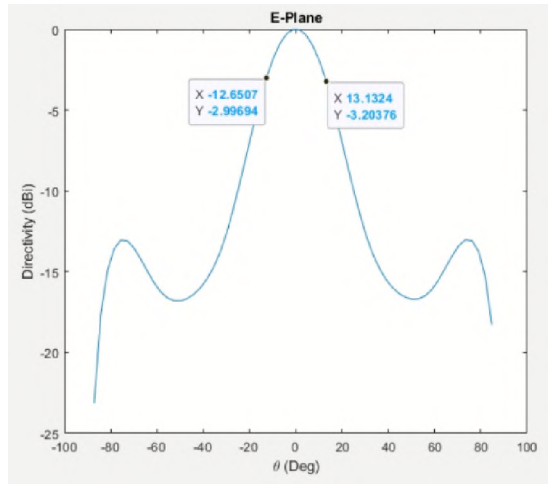


Рис. 17. Симуляция восстановленной диаграммы направленности в плоскости θ на основе идеальных данных

Как видно, ширина диаграммы направленности в плоскости θ , восстановленная на основе идеальных данных, составляет $2\theta'_{0.5} \approx 25,55^\circ$, что совпадает с результатами, полученными на основе данных, зарегистрированных зондами многозондовой системы ближней зоны. Разница между ними составляет $\Delta 2\theta_{0.5} \approx 2\theta_{0.5} - 2\theta'_{0.5} \approx 0,05^\circ$, что практически несущественно и свидетельствует о высокой точности разработанной системы измерений антенн в ближней зоне.

Аналогичные измерения были повторены уже с использованием реальной спроектированной измерительной системы. Система построена на основе 7 зондов с антеннами Вивальди, при этом каждый зонд размещён на расстоянии 10 мм от соседнего. Данное расстояние удовлетворяет критерию пространственной дискретизации, так как половина длины волны рабочего сигнала $\lambda_{op}/2 = 14,98$ мм превышает 10 мм.

Тестируемая антенна размещена в центре линейной решётки из зондов АВА, где предполагается, что напряжённость электрического поля E достигает максимума. Полученные значения компонент поля E_x и E_y представлены на рис. 18.

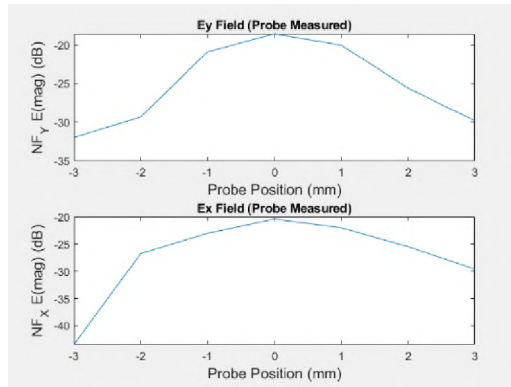


Рис. 18. Измеренные X- и Y-компоненты электрического поля E в реальной измерительной системе

Преобразование из ближней зоны в дальнюю зону было выполнено на основе метода NF–FF. Спектры плоских волн вдоль осей X и Y были рассчитаны с использованием интерполяции с целью восстановления диаграммы направленности в дальней зоне.

Восстановленная диаграмма направленности для рупорной антенны DRH50 представлена на рис. 19.

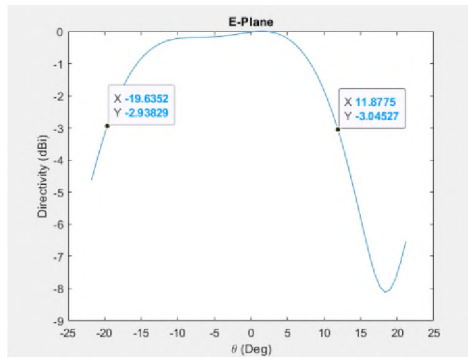


Рис. 19. Восстановленная диаграмма направленности антенны DRH50 в плоскости θ с использованием разработанной системы

Восстановленная диаграмма направленности показывает, что ширина главного лепестка диаграммы направленности тестируемой антенны составляет приблизительно $2\theta_{0.5} \approx 30^\circ$, что соответствует техническим характеристикам, предоставленным производителем антенны DRH50 для частоты 10 ГГц (рис. 20).

Таким образом, применение измерительной системы, основанной на многозондовом принципе PNFR, позволяет исключить временные затраты, связанные с позиционированием зонда. Как уже было отмечено ранее, общее время тестирования в данной системе определяется исключительно временем измерения с помощью

устройства VST и временем переключения мультиплексора.

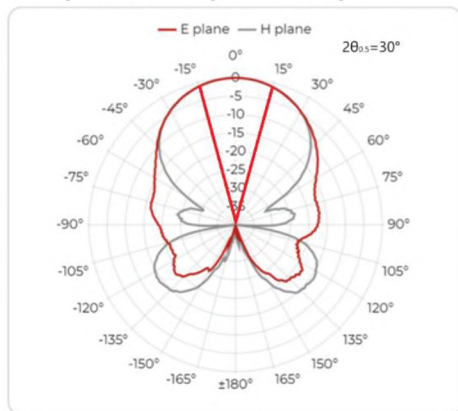


Рис. 20. Диаграмма направленности антенны DRH50 при частоте 10 ГГц согласно техпаспортным данным

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Исследования, проведённые в рамках диссертационной работы, подтверждают, что с помощью разработанной измерительной системы на основе многозондовой архитектуры можно достичь точности измерений, сопоставимой с существующими дальнеполевыми и компактными измерительными системами, причем за значительно меньшее время и в широком частотном диапазоне. Время тестирования одной антенны составило 3 секунды при сборе 200 измерений, тогда как в существующих промышленных системах оно достигает 33 секунд.

В результате, использования многозондовой системы ближней зоны с плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией время тестирования антенны сокращается в $11 * N_{VST}$ раз, где N_{VST} — количество синхронизированных приёмопередающих устройств (VST).

В работе представлено проектирование многозондовой системы измерений антенн в ближней зоне с плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией, основанной на применении антиподальной антенны Вивальди (АВА) в качестве измерительного зонда. Предлагаемая система, по сравнению с традиционными методами с механически сканируемыми зондами, обладает упрощённой механической конструкцией, что приводит к существенному улучшению как по времени тестирования, так и по общей эффективности. В процессе проектирования зондов были исследованы характеристики антиподальной антенны Вивальди с учётом как физических свойств диэлектрической подложки, так и геометрических параметров с целью оптимизации рабочих характеристик антенны.

В результате моделирования и оптимизации были получены АВА антенны с необходимыми характеристиками: компактные размеры, широкий рабочий частотный диапазон и минимальные искажения сигнала, что делает их подходящими для интеграции в разрабатываемую измерительную систему.

В симуляционной среде в качестве тестируемой антенны для параметризации фазированной решётки 1×4 было использовано 17 зондов на основе антенны Вивальди.

Данные ближней зоны, полученные при измерении тестируемой антенны, а также идеализированные компоненты поля ближней зоны, полученные в среде моделирования ФЕКО, были использованы для проведения сравнительного анализа диаграмм направленности. Данные ближней зоны, зафиксированные зондами, были преобразованы в характеристики излучения в дальней зоне с использованием алгоритма восстановления NF-FF, реализованного в программной среде MATLAB. Результаты анализа показывают, что разница в ширине главного лепестка диаграммы направленности между методом на основе зондов и идеализированным подходом составляет $\Delta 2\theta_{0.5} \approx \pm 0,05^\circ$. Это незначительное расхождение свидетельствует о высокой достоверности разработанной измерительной системы.

Разработан прототип измерительной системы ближней зоны с многозондовой структурой и плоско-прямоугольной геометрической конфигурацией. Спроектированы и изготовлены семь измерительных модулей на основе антенн Вивальди, которые были установлены при помощи механического держателя, изготовленного на 3D-принтере. Изготовленные антенны АВА продемонстрировали удовлетворительные значения коэффициента стоячей волны в широком диапазоне частот, что подтверждает применимость системы для широкополосных измерений.

Диаграмма направленности была восстановлена в соответствующей плоскости, а полученная ширина главного лепестка на половине мощности была сопоставлена с характеристиками, предоставленными производителем тестируемой антенны. Соответствие между восстановленной шириной луча и паспортными данными подтверждает высокую точность измерительной системы.

Результаты, полученные с помощью системы, а также время, затраченное на измерения в заданных точках дискретизации, демонстрируют эффективность и стабильность работы разработанного решения.

Полученные в ходе исследования результаты и разработанный прототип могут быть использованы предприятиями радиочастотной промышленности для точной характеристики антенн, особенно в тех случаях, когда ключевое значение имеют компактность измерительной установки и высокая скорость тестирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Antonyan S.**, Gomtsyan H. Multiprobe Planar Near-field Range Antenna Measurement System with Improved Performance// Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2024. – vol.97. – №3. – P. 17-22.
2. **Antonyan S.** System Design and Implementation of Multiprobe Planar Near Field Antenna Measurements// Armenian Journal of Physics. – 2024. – vol. 17. – №4. – P. 78-83.
3. Hovhannisyan B., Margaryan N., Tsaturyan G., **Antonyan S.**, Ohanyan G., Manvelyan M. Method for Precise Synchronization Between Multiple Vector Signal Generators// Proceedings of the Yerevan State University. – 2020. – 54(1). – P. 61-64.
4. Խաչատրյան Լ.Խ., Անտոնյան Տ.Վ., **Անտոնյան Ս.Վ.**, Հակոբյան Ռ.Ա., Ճառսուրյան Գ.Ա. Կոնսան ճեղքով տպաստալային անտենայի նախագծումը// ՀԱԳՀ Իրարեր գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան. – 2022. – մաս 1. – էջ 252-261.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Անտենաների թեստավորումը ներկայումս գտնվում է վերափոխման փուլում, պայմանավորված բարձր հաճախությամբ և ավելի բարդ կառուցվածքով անտենային համակարգերի արագ զարգացմամբ, որոնք նախատեսված են հաջորդ սերնդի կիրառությունների համար, այդ թվում՝ 5G շարժական կապի, արբանյակային հաղորդակցության, ավտոմոբիլային ռադարի և սպասվող 6G տեխնոլոգիաների ոլորտներում: Այս տեխնոլոգիական առաջընթացը զգալիորեն խստացրել է պահանջները անտենաների բնութագրերի ստացման մեթոդների նկատմամբ, որոնք այժմ պետք է ապահովեն ոչ միայն բարձր ճշգրտություն, լայն հաճախային տիրույթ և բևեռացման զգայունություն, այլև արագ չափման գործընթաց, կրկնելիություն և ծախսարդյունավետություն: Ավանդական հեռավոր գոտու չափման մեթոդներն աստիճանաբար կորցնում են իրենց արդիականությունը՝ այդ պահանջները բավարարելու ունակության բացակայության պատճառով: Դրանց կախվածությունը մեծ պոլիգոններ պահանջող փորձարարական միջավայրերից, շրջակա միջավայրի պայմանների հանդեպ զգայունությունը և մասշտաբելիության սահմանափակ հնարավորությունները նվազեցնում են կիրառելիությունը ժամանակակից հետազոտական և արդյունաբերական միջավայրերում՝ հատկապես այն դեպքերում, երբ անհրաժեշտ է թեստավորել էլեկտրականապես մեծ անտենաներ: Այս խնդիրների լուծման համար, որպես նորարարական և ծախսարդյունավետ այլընտրանք, լայն տարածում են գտել մոտակա գոտում անտենաների չափման մեթոդները, որոնք հնարավորություն են տալիս բարձր ճշգրտությամբ գնահատել անտենաների հատկությունները՝ կոմպակտ և վերահսկվող լաբորատոր պայմաններում:

Մոտակա գոտում չափման մեթոդները, հատկապես հարթ երկրաչափական կոնֆիգուրացիայով մոտակա գոտու չափման համակարգերը (անգլ. Plane Near Field Range-PNFR), հանդիսանում են որպես կոմպակտ այլընտրանք՝ ավանդական բացօթյա հեռավոր գոտու չափման համակարգերի փոխարեն: PNFR համակարգերը հնարավորություն են տալիս ապահովել էլեկտրամագնիսական ամբողջական էկրանավորում, միջավայրի կայունություն և նվազագույն տարածքային պահանջներ: Այս առավելությունները PNFR համակարգերը դարձնում են հատկապես նպատակահարմար արտադրական գծերի վրա փորձարկումներ իրականացնելու համար, որտեղ տարածքային սահմանափակումները կարող են խաթարել չափումների արագությունը և արդյունավետությունը:

Մոտակա գոտում մեթոդների կիրառման հիմնական շարժառիթներից մեկը հանդիսանում է $2D^2/\lambda$ տիրույթի հեռավորության սահմանափակման վերացումը, ինչը զգալիորեն սահմանափակում է հեռավոր գոտում մեթոդների կիրառելիությունը էլեկտրականապես մեծ անտենաների փորձարկման համար: Ընդհակառակը, PNFR հնարավորություն են տալիս թեստավորել անտենաներ

համեմատաբար փոքր անարձագանք խցիկներում: Սա ոչ միայն նվազեցնում է տարածական և կառուցվածքային պահանջները, այլև էականորեն բարելավում է չափումների կրկնելիությունը՝ նվազագույնի հասցնելով շրջակա միջավայրի փոփոխական գործոնների ազդեցությունը, ինչպիսիք են ջերմաստիճանը, խոնավությունը, քամին և ռադիոհաճախային խանգարումները:

Մոտակա գոտում չափման հիմնական գաղափարը կայանում է նրանում, որ թեստավորվող անտենայի մոտակա գոտում գրանցվում են էլեկտրամագնիսական դաշտի ամպլիտուդային և փուլային բաղադրիչները, որոնք այնուհետև փոխակերպվում են հեռավոր գոտում ճառագայթման ուղղվածության դիագրամի՝ կիրառելով մաթեմատիկական ալգորիթմներ, ինչպիսիք են հարթ ալիքի մոդալային ընդարձակումը հիմնված Ֆուրիեի հակադարձ ձևափոխության վրա: Ըստ IEEE Std 149 ստանդարտի, մոտակա գոտու մեթոդները կարող են ապահովել գերազանց ճշգրտություն՝ հատկապես այն դեպքում, երբ կիրառվում են համապատասխան չափաբերման և փոխակերպման ալգորիթմներ:

Անտենախոսության նպատակը: Անտենաների մոտակա գոտում հարթ-ուղղանկյուն կոնֆիգուրացիա երկրաչափությամբ բազմազոնդ լայնաշերտ, արդյունավետ և արագագործ չափման համակարգի հետազոտում, մշակում և նախագծում՝ էլեկտրականապես մեծ անտենաների չափման համակարգերի, լաբորատոր միջավայրում անտենաների չափման համակարգերի և ռադիոտեխնիկական այլ բազմազան խնդիրների համար: Աշխատանքի նպատակին հասնելու համար իրականացվել է հետևյալ հետազոտությունները.

- Անտենաների մոտակա գոտում չափման համակարգերի եղանակների համեմատական վերլուծություն;
- Անտենաների մոտակա գոտում չափման համակարգերի հետազոտական և սիմուլյացիոն մոդելի մշակում հիմնված անտիպոդալ Վիվալդի անտենաների որպես չափիչ զոնդեր և փուլավորված անտենային ցանց որպես թեստավորվող անտենա;
- Անտիպոդալ Վիվալդի անտենայի որպես լայնաշերտ չափիչ զոնդի նախագծում, նախատիպի մշակում, բնութագրերի ստացում;
- Սինքրոնացված միաժամանակ հաշվանքների հավաքագրման ալգորիթմի մոդելավորում, և դրա մշակումը վեկտորական ազդանշանի ընդունահաղորդիչ սարքերի վրա՝ նախատեսված ապահովելու մոտակա գոտում դաշտի լարվածության արժեքների հավաքագրումը;
- Մոտակա գոտում բազմազոնդ համակարգի մշակում, նախատիպի պատրաստումը, չափման համակարգի միջոցով էտալոնային անտենայի բնութագրի ստացումը, դրա արդյունքում մշակված անտենաների մոտակա գոտում չափիչ համակարգի վավերացումը;

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR REDUCING ANTENNA
CHARACTERIZATION TIME IN THE NEAR FIELD**

SUMMARY

Antenna testing is currently undergoing a transformative phase, driven by the rapid development of high-frequency and increasingly complex antenna systems designed for next-generation applications—including 5G mobile communications, satellite communication, automotive radar, and the emerging 6G technologies. This technological advancement has significantly increased the demands placed on antenna characterization methods, which are now expected to provide not only high accuracy, wide frequency coverage, and polarization sensitivity, but also faster measurement time, repeatability, and cost efficiency.

Traditional far-field measurement techniques are gradually becoming obsolete due to their inability to meet these evolving requirements. Their reliance on large outdoor test ranges, sensitivity to environmental conditions, and limited scalability reduce their applicability in modern research and industrial contexts—particularly in scenarios involving the testing of electrically large antennas.

To address these challenges, near-field measurement techniques have emerged as an innovative and cost-effective alternative. These methods enable high-precision characterization of antennas in compact and controlled laboratory environments, making them highly suitable for modern testing applications.

Near-field measurement techniques—particularly those employing plane geometrical configurations, known as Plane Near-Field Range (PNFR) systems—serve as compact alternatives to traditional outdoor far-field measurement systems. PNFR systems offer several key advantages, including complete electromagnetic shielding, environmental stability, and minimal spatial requirements. These features make PNFR systems particularly well-suited for implementation in production line environments, where space constraints can interfere the speed and efficiency of antenna measurements.

One of the primary motivations for adopting near-field measurement techniques is the elimination of the distance limitation defined by the $2D^2/\lambda$ criterion, which significantly restricts the applicability of far-field methods for testing electrically large antennas. In contrast, PNFR systems enable antenna characterization within relatively compact anechoic chambers. This not only reduces spatial and structural requirements but also substantially improves measurement repeatability by minimizing the influence of environmental variations such as temperature, humidity, wind, and radio-frequency interference.

The core principle of near-field measurement lies in capturing the amplitude and phase components of the electromagnetic field in the near-field region of the antenna under test. These data are then transformed into far-field radiation patterns using mathematical algorithms, such as plane-wave modal expansion based on the inverse Fourier transform. According to IEEE Standard 149, near-field methods can achieve excellent accuracy when calibration and transformation procedures are applied.

Dissertation objective is the investigation, development, and design of a broadband, efficient, and high-speed near-field measurement system with a planar-rectangular geometrical configuration and a multi-probe architecture. The system is intended for the characterization of

electrically large antennas, laboratory-based antenna measurements, and a wide range of other RF measurement applications.

To achieve this objective, the following research tasks were undertaken:

- Comparative analysis of antenna measurement methodologies used in near-field antenna characterization systems;
- Investigation and development of simulation model of a near-field antenna measurement system based on antipodal Vivaldi antennas as measurement probes and a phased antenna array as the antenna under test;
- Design, prototyping, and characterization of an antipodal Vivaldi antennas as a broadband measurement probes;
- Implementation of the synchronization algorithm for multi-channel vector signal transceivers for simultaneous data acquisition intended for capturing electric field samples in the near-field region;
- Development of a multi-probe near-field measurement system, fabrication of a prototype, and validation of the multi-probe setup through extraction of reference antenna parameters and comparison of results with reference antenna's vendor provided specifications.

