

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

ԹԱԳԵՎՈՍՅԱՆ ՍՈՒՍԱՆՆԱ ՌԱՖԻԿԻ

**ՄԻԼԻՄԵՏՐԱԿԱՆ ՏԻՐՈՒԹԻ ԱՆՏԵՆԱՆԵՐԻ ՄՈՏԱԿԱԿ ԴԱՇՏԻ
ԱՎՏՈՄԱՏ ԶԱՓՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ԿԻՐԱՌՎՈՂ ԶՈՆԻ
ԴԻՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ և ՀՏԱԶՈՏՈՒՄ**

Ե.12.03 – «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և
համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

ТАДЕВОСЯН СУСАННА РАФИКОВНА

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ПРОБНОГО ЗОНДА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ БЛИЖНЕГО
ПОЛЯ АНТЕНН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 12.03 – “Телекоммуникационные сети, устройства и системы ”

ЕРЕВАН 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ռուս-Հայկական համալսարանում:
Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Ավետիսյան Վահան Հենրիկի
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆ-մ.գ.դ., պրոֆեսոր Ահարոնյան Կամո Համլետի
տ.գ.թ. Էրամյան Սուրեն Գևորգի

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և Էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. սեպտեմբերի 4-ին՝ ժամը
16⁰⁰ -ին, ՀԱՊՀ-ում գործող <<Ռադիոտեխնիկայի և Էլեկտրոնիկայի>> 046
Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17
մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2026 թվականի հուլիսի 31-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝ տ.գ.թ.  Բադալյան Բենիամին Ֆելիքսի

Тема диссертации утверждена в Российско-Армянском университете.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Аветисян Ваан Генрихович
Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор Агаронян Камо Гамлетович
к.т.н. Эйрамджян Сурен Геворгович

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 4-го сентября 2026г. в 16:00 на заседании
специализированного совета 046 “Радиотехника и электроника”, действующего при
Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009,
г.Ереван, ул. Теряна 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 31-го июля 2026г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046, к.т.н  Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современные антенные системы радиотехнических систем миллиметрового диапазона различного рода характеризуются сложной структурой диаграмм направленности и высокой чувствительностью к геометрическим параметрам антенной системы. Для правильного восстановления дальнего поля антенной системы и точного определения ее параметров методом антенных измерений по ближнему полю на плоскости требуется высокая плотность измерительной сетки и высокой точности позиционирования зонда, измеряющего ближнее поле антенны. В таких условиях возрастает значение системы автоматического управления (САУ) антенно-измерительного комплекса (АИК) в автоматизации измерительного процесса и обеспечения высокой повторяемости результатов. Это значительно, минимум на порядок, превышает требования, предъявляемые к системам, работающим в СВЧ диапазоне.

Существующие системы позиционирования не всегда обеспечивают требуемую точность при возвратно-поступательных перемещениях, особенно при наличии механических люфтов и динамических нагрузок. Это приводит к накоплению ошибок и снижению достоверности измерений. Кроме того, в ряде случаев отсутствует возможность гибкого управления параметрами зоны сканирования, что ограничивает функциональные возможности измерительных комплексов. Необходимость изменения размеров зоны сканирования и её положения требует разработки адаптивных алгоритмов управления измерениями.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется и обусловлена необходимостью создания системы САУ АИК для эффективных решений совокупности вышеотмеченных факторов. Разработанная САУ должна быть направленной на совершенствование алгоритмов управления, обеспечение согласованной работы всех компонентов, повышение точности позиционирования измерительного зонда и надежности работы АИК по определению характеристик испытываемой антенны (ИА) миллиметрового диапазона.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование точных устройств позиционирования измерительного зонда, устройств управления автоматическим процессом измерений и алгоритма совокупной работы компонент АИК. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ современных методов антенных измерений и их особенностей;
- исследование структуры и принципов построения АИК по ближнему полю на плоскости;
- анализ существующих систем автоматического управления и методов их реализации;

- разработка структуры САУ для АИК миллиметрового диапазона;
- разработка устройств позиционирования измерительного зонда с использованием фотодатчиков с щелевыми периодическими структурами;
- создание системы электронного управления возвратно-поступательными перемещениями зонда;
- разработка алгоритма работы САУ с обеспечением возможности электронного управления размерами зоны сканирования зонда на плоскости;
- проведение экспериментальных исследований точности позиционирования;

Научная новизна диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен подход к построению САУ АИК для планарных измерений ближнего поля антенн миллиметрового диапазона с использованием программных средств и устройств ввода-вывода данных;
- разработаны фотодатчики позиционирования измерительного зонда и механизмы их интеграции с системой перемещения зонда по двум координатам;
- создана система электронного управления возвратно-поступательными перемещениями измерительного зонда;
- разработана система, обеспечивающая электронное управление положением и размерами зоны сканирования.
- разработан алгоритм функционирования АИК, осуществляющий также непрерывный контроль работы его основных компонент.

Научная и практическая ценность диссертационной работы.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов построения САУ для АИК по определению характеристик ИА миллиметрового диапазона по измерениям их ближнего поля путем интегрирования средств программного обеспечения с современными устройствами ввода-вывода данных. Практическая значимость определяется возможностью применения разработанных устройств при создании и модернизации подобных АИК, обеспечивающих высокую точность и надёжность.

Методология исследования.

В работе использованы методы теории автоматического управления, цифровой обработки сигналов, математического моделирования и экспериментальных исследований. Реализация алгоритмов выполнена с применением среды LabVIEW, а также микроконтроллерных платформ. Экспериментальная часть основана на использовании разработанного измерительного стенда.

Внедрение результатов работы.

Разработанные и изготовленные устройства внедрены и используются в демонстрационно - учебном оборудовании в “Лаборатории по обработке и исследованию сигналов ” Института математики, физики и высоких технологий Российско-Армянского университета.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- структура системы автоматического управления АИК;
- структура алгоритма управления автоматическими антенными измерениями;
- результаты экспериментальных исследований точности позиционирования измерительного зонда и методы её повышения.
- повышение надежности антенных измерений.

Апробация полученных результатов.

Основные положения и результаты работы представлены на:

- 14-ой годичной научной конференции Российско-Армянского университета (РАУ, Ереван, декабрь 2019г.)
- 15-ой годичной научной конференции Российско-Армянского университета (РАУ, Ереван, декабрь 2021г.)
- 16-ой годичной научной конференции Российско-Армянского университета (РАУ, Ереван, декабрь 2022г.)
- International Conference on Microwave & THz Technologies and Optoelectronics (НАН РА, Ереван, Сентябрь 2022г.)
- совместных научных семинарах Ереванского НИИ средств связи и базовой кафедры “Телекоммуникации” Российско-Армянского университета.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы три научные работы. В их числе: одна статья в издании, индексируемом в международной базе Scopus (без соавторов) и еще две статьи в научном журнале, одна из которых также без соавторов.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы включающего 84 наименования. Общий объем диссертации составляет 131 страницу, включая 89 рисунков и 7 таблиц. Диссертационная работа написана на русском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Краткий обзор антенных измерений

1.1. Обзор антенных измерений

В рамках первого параграфа настоящей главы проведен детальный анализ существующих методов измерения характеристик антенных систем. Особое внимание уделено концептуальным положениям амплифазометрических измерений в ближней зоне с последующим пересчетом в дальнюю зону через преобразование Фурье.

Ближняя зона антенны характеризуется расстояниями порядка λ от поверхности антенны до расстояния $(D_A/2\lambda)^{1/3} D_A/2 + \lambda$, где λ - длина излучаемой или принимаемой волны, D_A - диаметр раскрыва антенны. Поле в дальней зоне ИА определяется единственным образом по ее комплексному полю в ближней зоне на охватывающей ИА поверхности.

Антенные измерения могут проводится на трех поверхностях: плоской, сферической и цилиндрической.

Дальнее поле ИА является интегральной характеристикой ближнего поля. Поэтому при ошибочных измерениях ближнего поля в отдельных точках точность восстановления дальнего поля не претерпевает больших изменений, что является существенным преимуществом при определении характеристик антенн. Это обстоятельство обуславливает высокую потенциальную точность определения характеристик антенны по методу ближнего поля. В случае измерений на плоскости в ближнем поле антенны для восстановленного ее дальнего поля имеем следующее известное выражение.

$$\dot{E}(\theta, \phi) = j \frac{(1 + \cos \theta) e^{-jkr}}{2\lambda r} \iint_S \dot{E}(x, y) e^{jk \sin \theta (x \cos \phi + y \sin \phi)} dx dy \quad (1)$$

Где $dx dy = dS$ - элемент площадки с координатами X и Y в плоскости XOY ; $\dot{E}(x, y)$ - тангенциальная составляющая электрического комплексного поля в точке X, Y в ближнем поле; $\dot{E}(\theta, \phi)$ - дальнее комплексное электрическое поле антенны на сфере с радиусом r в направлении θ и ϕ ; r - расстояние от начала координат на выбранной плоскости до точки, в которой определяется поле $\dot{E}(\theta, \phi)$, θ и ϕ - углы в сферической системе координат. В реальных планарных антенных измерениях по ближнему полю остронаправленных ИА поле в их раскрыве измеряется в дискретных узлах прямоугольной сетки координат. Шаг сетки однозначно определяет угловой сектор восстановления дальнего поля ИА в соответствии с теорией выборки Котельникова-Уиттекера.

Пространственное ограничение поперечной протяженности измерений определяется спадом ближнего поля приблизительно на -40дБ. При этом протяжённость измерения для остронаправленных антенн составляет $1,5D_A$.

В работе так же представлен обзор современных программно-аппаратных комплексов и приведена детализированная структурная схема системы автоматического управления (САУ). Данная схема включает в себя контуры управления сканирующим устройством, подсистему синхронизации опорного и измерительного сигналов.

1.2. Структурная схема автоматического измерительного комплекса диапазона миллиметровых волн и проблемы при его реализации

АИК антенных измерений ближнего поля диапазона ММВ – это автоматический комплекс, состоящий из следующих основных подсистем: подсистема механического сканирования ближнего поля, радиоизмерительная подсистема, подсистема автоматического управления измерениями и подсистема математической обработки данных. На рис. 1. представлена структурная схема планарного АИК.

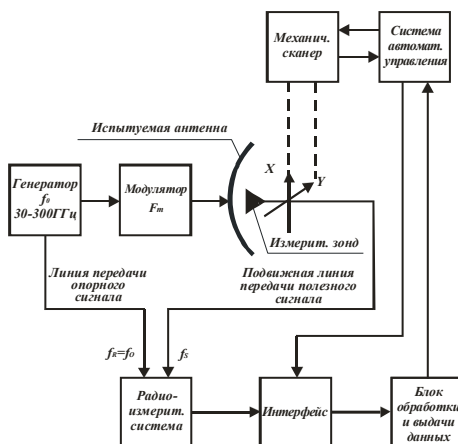


Рис.1. Структурная схема планарного АИК

Основные единицы схемы.

1. Механический сканер (МС) – система приводов движения измерительного зонда на плоскости, благодаря которой выполняется точное сканирование поля ИА.
2. Система автоматического управления (САУ) – система управления МС и синхронного управления измерениями.
3. Радиоизмерительная система (РС) выполняет измерения ближнего комплексного электрического поля на плоскости.
4. Интерфейс выполняет преобразование входной информации в соответствующие выходные цифровые данные, необходимые для дальнейшей обработки.
5. Блок обработки и выдачи данных (БОВД). В БОВД выполняет сохранение и обработку полученных данных от интерфейса алгоритмом быстрого преобразования

Фурье (БПФ).

В данной подглаве так же сформулированы основные требования к системе автоматического управления АИК. К ним относятся обеспечение высокой точности позиционирования измерительного зонда, сокращение времени проведения измерений и сохранение стабильности характеристик измерительного тракта в широком диапазоне частот. Так же рассмотрены особенности реализации АИК в миллиметровом диапазоне волн. Отмечено, что при переходе в ММВ диапазон существенно возрастают требования к стабильности фазовых характеристик системы. Рассмотрены основные причины нестабильности таких систем, связанные с механическими вибрациями. Отдельное внимание уделено ошибкам позиционирования измерительного зонда. Показано, что в миллиметровом диапазоне даже небольшие отклонения координат приводят к искажению фазовой матрицы измерений и ухудшению точности восстановления диаграммы направленности антенны.

Глава 2. Системы САУ АИК миллиметрового диапазона

2.1. Обзор и анализ устройств позиционирования зонда АИК

В первой подглаве второй главы проведен обзор и анализ устройств позиционирования зонда: сканеры САУ измерениями с различными типами механических приводов движения кареток, фотодатчики для регистрации координат точек отсчетов зонда, примененная периодическая структура и основные условия ее построения.

Обзор и анализ устройств нализ устройств позиционирования зонда АИК выполнен на основе сформулированных требований к САУ АИК:

- Обеспечение шагов съема информации, соответствующих интервалу от нескольких длин волны до половины длины волны частоты измерений;
- Обеспечение минимальных вносимых искажений измеряемого поля элементами САУ;
- Обеспечение синхронной работы датчиков с поступательными перемещениями зонда;
- Обеспечения ошибок позиционирования зонда порядка сотых долей длины рабочей волны;
- Для минимизации времени измерений обеспечение электронного управления протяженности зоны сканирования зонда для каждой конкретной антенны диапазона ММВ.

2.2. Обзор и анализ САУ АИК

Во второй подглаве представлена ранее разработанная схема САУ с обеспечением выше изложенных требований.

Схема САУ имеет ряд преимуществ:

- уменьшает ошибку позиционирования зонда, обеспечивая ошибку порядка $\lambda/100$
- упрощена конструкция периодической структуры
- требования на стабильность фотодатчика снижены
- возможность установки электронным способом протяжённости места и зоны сканирования
- минимизация времени испытаний
- снижение искажений измеряемого поля, вводимых узлами автоматики
- предоставляется возможность проведения испытаний антенн ММВ диаметрами в несколько сот λ
- снижение расходов при испытаниях антенн ММВ диапазонов

Однако, представленная схема САУ является многоэлементной и сложной в построении, чем снижается надежность функционирования АИК.

2.3. Оценки ошибок позиционирования зонда в АИК миллиметрового диапазона

В третьей подглаве проведена оценка ошибок позиционирования зонда, представлено соотношение между характеристиками периодической структуры для обеспечения минимальности величины ошибок.

Применение современных средств и способов цифровой обработки сигналов создает предпосылки для разработки САУ с упрощенной элементной структурой и большими возможностями электронного управления, что позволит избежать вышеизложенных недостатков представленных в главе схем САУ.

Глава 3. САУ в АИК на основе дисковой периодической структуре

3.1. Сканер автоматического измерительного комплекса

В первой подглаве данной главы рассмотрен сканер автоматического измерительного комплекса и описано его общее построение. Протяжённость зоны сканирования, которая может быть обеспечена представленным сканером с шарико-винтовым приводом, равна 1м. При такой зоне сканирования обеспечивается измерение параметров остро направленных антенн с диаметром 0,7 м. При этом для антенн миллиметрового диапазона ширина главного лепестка может составлять величину от 0,1 – 1 градуса. Представлены основные преимущества шарико-винтовых приводов движения кареток зонда и именно по этой причине был выбран этот тип приводов при построении АИК.

3.2. Идеология построения системы автоматического управления

Во второй подглаве представлена идея упрощения системы САУ. Сутью упрощения является исключение зонной щели и его фотодатчика при сохранении всех функциональных возможностей системы управления при применении цифровой обработки сигналов.

3.3. Конструкция фотодатчика

В третьей подглаве представлен расчет и конструкция датчика. Параметры

рассчитанного и реализуемого диска следующие:

- Диаметр диска равен 140 мм
- Количество шаговых щелей равно 24, угол между двумя соседними щелями равен 15°
- Диаметр шаговый щели равен 2 мм
- Минимальный шаг съема информации равен $\tau_{min} = 1$ мм
- Количество точек съема информации $m = 960$

Были изучены различные типы оптопар и выбрана TCST2103 оптопара ввиду ее особенностей и применения в различных системах. Для оптимального получения выходного сигнала оптопары и его дальнейшей обработки разработана электрическая схема. Схема была протестирована в реальных условиях вращения дисковой периодической структуры.

3.4. Устройства регулирования хода зонда

Для наладки и испытаний системы волноводной тромбонной компенсации изменения длины подвижной линии передачи АИК были разработаны устройства регулирования хода зонда. Устройства регулирования хода зонда – это совокупность устройств, позволяющих менять направление хода зонда, а также запускать и останавливать его.

Ниже представлена схема (рис. 2) управления движения зонда. Подсистема включает узлы электропитания, управления приводом, коммутационные элементы, устройства временной задержки и элементы контроля крайних положений измерительного зонда.

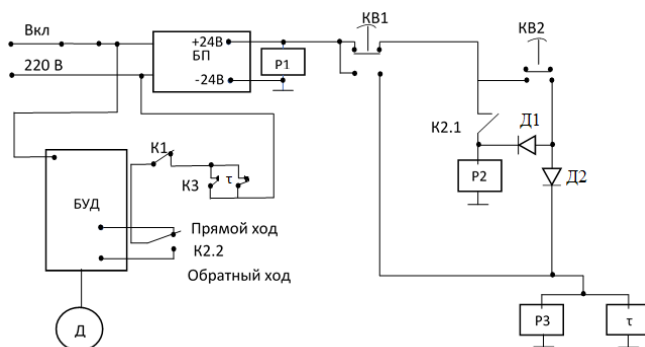


Рис. 2. Схема управления движения зонда

Глава 4. Экспериментальные исследования разработанной САУ

4.1. Алгоритм управления САУ

Исследование в данной подглаве посвящено разработке, реализации системы автоматического управления (САУ) АИК, предназначенным для диагностики

пространственного распределения электромагнитных полей в миллиметровом диапазоне длин волн. Основной акцент в работе сделан на переходе от традиционных механических методов синхронизации к современным программно-определяемым алгоритмам управления, что позволило существенно повысить точность позиционирования измерительного зонда и надежность всего комплекса. Разработанная структура САУ, траектория “меандр” движения измерительного подвижного зонда на плоскости, периодические исходные импульсы (ИИ), вырабатываемые а также соответствующие управляющие шаговые импульсы представлены на рис.3.

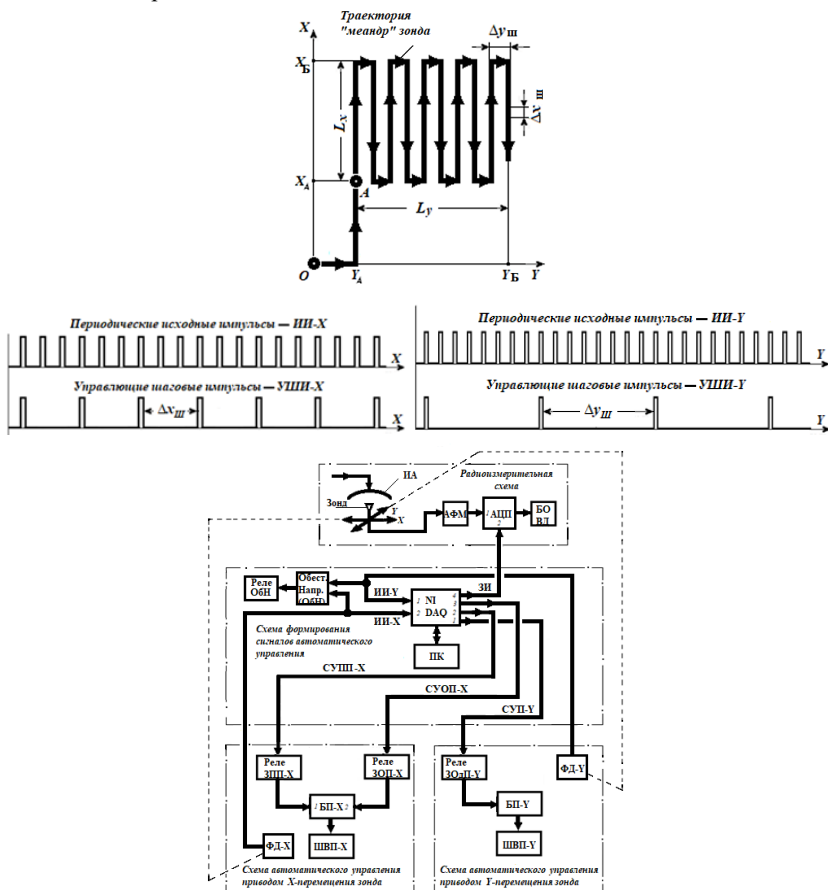


Рис. 3.Траектория движения зонда, ИИ при X- и Y перемещении зонда, структурная схема САУ

В процессе разработки измерительной установки был проведен глубокий анализ трех итераций технических решений, зафиксированных в авторских свидетельствах и патентах. Этот анализ необходим для понимания причинно-следственных связей, приведших к текущей конфигурации системы. Исходное устройство базировалось на жесткой механической синхронизации, где положение зонда фиксировалось фотодатчиком, перемещающимся по каретке. Использование оптопары и дисковой щелевой структуры позволяло формировать управляющие импульсы, однако такая архитектура обладала критической чувствительностью к нестабильности светового потока и порогов срабатывания формирователей импульсов. Дальнейшее развитие в устройстве было направлено на внедрение электронной многоэлементной схемы управления на логических элементах. Несмотря на появление возможности электронного выбора зоны сканирования (вместо механического перемещения диафрагм), сложность аппаратной части и наличие двух оптопар со своими механизмами синхронизации снижали общую надежность системы. В таблице 1 представлен сравнительный анализ архитектурных решений, исследованных в рамках главы.

Таблица 1. Сравнительный анализ технических реализаций САУ

Параметр сравнения	Устройство	Устройство	Устройство
Способ выбора зоны сканирования	Механический (перемещение диафрагм)	Электронный (многоэлементная логика)	Программный (ПО LabVIEW + NI USB-6501)
Количество оптопар	Одна (совмещенная)	Две (зонная и шаговая)	Одна (упрощенная)
Механизм синхронизации	Стальной трос + спираль Архимеда	Дублированные механизмы	Оптимизированный механизм X-синхронизации
Надежность и стабильность	Низкая (дрейф порогов, износ троса)	Средняя (высокая сложность электроники)	Высокая (минимизация аппаратной части)
Точность позиционирования	Подвержена случайным ошибкам реверса	Средняя	Высокая (компенсация люфтов ПО)

Переход к программно-аппаратному комплексу позволил устранить избыточные механические узлы и передать функции логического управления программному обеспечению. Использование модуля цифрового ввода-вывода NI DAQ-USB 6501 в сочетании с персональным компьютером обеспечило гибкость настройки параметров сканирования без физического вмешательства в конструкцию сканера.

Программное обеспечение непрерывно анализирует поток исходных импульсов. Блок-схема алгоритма автоматизации измерений представлена на рис.4. Важным аспектом является то, что при выходе зонда за пределы зоны сканирования (зона «выбега») регистрация импульсов продолжается для сохранения координатной привязки, но генерация запускающих сигналов (ЗИ) для радиоизмерительной системы блокируется. Это исключает запись некорректных данных о поле вне установленных границ.

Рис.4. Блок-схема алгоритма автоматизации измерений

На программном и схемотехническом уровне реализована система защиты от сбоев фотодатчиков. Формирователь обесточивающего напряжения постоянно отслеживает наличие импульсов ИИ-Х и ИИ-У. В случае их внезапного исчезновения при активном сигнале управления приводом срабатывает реле, которое полностью отключает питание двигателей и активирует аварийную сигнализацию (лампа ЛЗ). Это предотвращает неконтролируемое движение зонда и защищает дорогостоящую измеряемую антенну от возможных столкновений.

4.2. Исследование параметров импульсов управления

В данной главе исследованы параметры управляющих импульсов системы автоматического управления измерительным зондом. Проведён анализ временных характеристик управляющих, исходных и запускающих импульсов, определяющих работу приводных механизмов и синхронизацию измерительного процесса. Установлено, что точность позиционирования зонда существенно зависит от корректного выбора временных задержек между отдельными сигналами системы. Показано, что разработанный алгоритм обеспечивает устойчивую работу приводов при прямом и обратном перемещении по координате Х, исключает накопление ошибок позиционирования и сохраняет корректную привязку измерительных данных к координатам сканирования. Исследована работа системы при выходе зонда за пределы рабочей области, при котором регистрация координатных импульсов сохраняется, а формирование запускающих импульсов временно блокируется. Экспериментальная проверка, выполненная с использованием измерительного комплекса NI VirtualBench, подтвердила правильность формирования управляющих сигналов и работоспособность предложенного алгоритма. Полученные результаты показали возможность применения разработанной системы для автоматизированных измерений ближнего поля антенн миллиметрового диапазона с обеспечением требуемой точности позиционирования измерительного зонда.

4.3. Исследование САУ и ошибок позиционирования перемещения зонда

Одной из наиболее важных частей четвертой главы является экспериментальное исследование точности позиционирования. Для этой цели была создана эталонная измерительная цепь, включающая цифровой считыватель линейных перемещений Ditron DL50 и линейную шкалу с разрешением 5 мкм. Для детального анализа динамики перемещения была разработана вспомогательная система на базе микроконтроллера Arduino Nano. Она осуществляла независимый подсчет импульсов энкодера. Структурная схема представлена на рис.5.

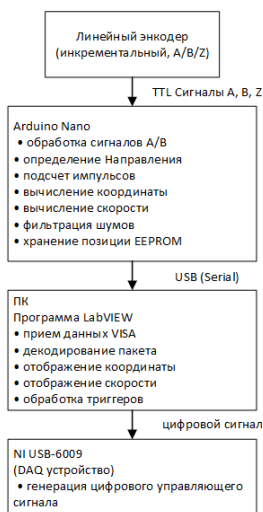


Рис. 5. Структурная схема системы оценки ошибки позиционирования зонда

В ходе экспериментов было выявлено расхождение координат измерительных точек при прямом и обратном перемещениях зонда. Это расхождение, определяемое как $\Delta x = x_{\text{прям}} - x_{\text{обрат}}$, в необработанном виде составило 0,03 мм см рис.6. Основной причиной данной погрешности является механический люфт в паре «винт-гайка» ШВП и конечный размер щели диска фотодатчика.

Прямой ход N1	Обратный ход N1	Прямой ход N2	Обратный ход N2	Ошибка позиционирования при прямом и обратном перемещении	Ошибка позиционирования при прямом перемещении	Ошибка позиционирования при обратном перемещении
8,02	7,98	8,01	7,94			
8,01	7,99	7,98	7,95			
8,02	7,99	8,00	7,95	0,03	0,02	0,04
3,01	2,96	2,99	2,91			
3,00	2,99	2,98	2,95			
3,01	2,98	2,99	2,93	0,03	0,02	0,04
-2,23	-2,28	-2,25	-2,33			
-2,26	-2,27	-2,28	-2,3			
-2,25	-2,28	-2,27	-2,32	0,03	0,02	0,04
-7,40	-7,46	-7,42	-7,5			
-7,43	-7,43	-7,45	-7,47			
-7,42	-7,445	-7,44	-7,49	0,03	0,02	0,04
-12,60	-12,66	-12,62	-12,7			
-12,63	-12,63	-12,65	-12,67			
-12,62	-12,65	-12,64	-12,69	0,03	0,02	0,04

Рис.6. Значения ошибок позиционирования

Экспериментально подтверждено, что регулировка зазора между выступом осевой втулки и насадкой диска позволяет эффективно компенсировать время выбора люфта. Время, за которое выступ проходит этот зазор при смене направления вращения, в точности соответствует времени, необходимому для выбора механического люфта каретки. Таким образом, несмотря на наличие физического зазора, система управления «видит» непрерывное и точное перемещение, что обеспечивает высокую повторяемость результатов измерений ближнего поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки и исследования устройств позиционирования измерительного зонда и системы автоматического управления его перемещением в составе автоматизированного антенного измерительного комплекса миллиметрового диапазона волн. Полученные результаты направлены на повышение точности измерений ближнего поля антенн и достоверности восстановления их характеристик в дальней зоне.

Проведённый анализ существующих методов антенных измерений показал, что метод измерений в ближнем поле является наиболее эффективным для исследования антенн миллиметрового диапазона. Вместе с тем установлено, что одним из основных факторов, ограничивающих точность измерений, является погрешность позиционирования измерительного зонда, возникающая вследствие механических люфтов, инерционных явлений и ошибок формирования управляющих воздействий.

В результате выполненных исследований разработана структура системы автоматического управления автоматизированного антенного измерительного комплекса, обеспечивающая согласованную работу приводных механизмов, измерительных устройств и средств обработки данных. Предложенная структура позволяет реализовать автоматическое сканирование исследуемой области с заданными параметрами и обеспечивает синхронизацию координатной и измерительной информации.

Разработаны устройства позиционирования измерительного зонда на основе модифицированных фотодатчиков с дисковой периодической структурой. Выполнены расчёт их основных параметров, выбор элементной базы и обоснование конструктивных решений. Предложенные устройства обеспечивают формирование координатных импульсов, необходимых для управления процессом сканирования и регистрации измерительной информации.

Разработан алгоритм управления автоматизированным антенным измерительным комплексом, обеспечивающий управление положением и размерами зоны сканирования, формирование управляющих и запускающих импульсов, а также синхронизацию процессов перемещения измерительного зонда и регистрации

результатов измерений. Реализация алгоритма позволяет адаптировать систему к различным режимам измерений и требованиям конкретных задач.

В ходе экспериментальных исследований изучены параметры управляющих импульсов и алгоритмы функционирования системы автоматического управления. Установлено, что корректный выбор временных параметров управляющих воздействий обеспечивает устойчивую работу приводных механизмов, согласованное функционирование всех узлов комплекса и повышение точности позиционирования измерительного зонда.

Для оценки точности работы разработанной системы создан специализированный программно-аппаратный комплекс на базе линейного энкодера Diron DL50 и микроконтроллера Arduino Nano. Проведённые исследования позволили определить фактические ошибки позиционирования при прямом и обратном перемещении измерительного зонда, а также оценить влияние реверсивных режимов работы на точность формирования координатной сетки измерений.

Экспериментально подтверждено, что предложенные технические решения позволяют существенно снизить ошибку позиционирования и уменьшить влияние механических люфтов при изменении направления движения зонда. Полученные результаты показали, что погрешность позиционирования не превышает значений, определяемых разрешающей способностью применяемой измерительной системы.

Важным результатом работы является разработка устройства измерения распределения электромагнитного поля в апертуре антенны с новой системой автоматического управления, защищённого патентом Республики Армения № 2026.01 (МПК G01R 29/10). Полученный патент подтверждает новизну предложенных технических решений и возможность их практического применения в современных антенных измерительных комплексах.

Таким образом, поставленная цель диссертационной работы достигнута. Разработаны и исследованы устройства позиционирования измерительного зонда, структура системы автоматического управления и алгоритм её функционирования, обеспечивающие повышение точности автоматических измерений ближнего поля антенн миллиметрового диапазона.

Основные результаты работы:

1. Проведён анализ методов антенных измерений в ближнем поле и определены требования к САУ измерениями.
2. Разработана структура системы автоматического управления АИК.
3. Созданы устройства позиционирования измерительного зонда.
4. Разработан алгоритм управления перемещением и зоной сканирования.
5. Проведены экспериментальные исследования точности позиционирования.
6. Получен патент на устройство измерения распределения поля с новой САУ .
7. Подтверждена эффективность предложенных решений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. С.Р. Тадевосян. «Разработка инструментария в программной среде LabVIEW для коллиматорного метода антенных измерений в диапазоне миллиметровых волн» Вестник РАУ No 2, 2021, 18-26
2. С.Р. Тадевосян, В.Г. Аветисян, С.М. Аветисян «Устройства регулирования прямого и реверсивного хода измерительного зонда при автоматических измерениях ближнего поля антенн миллиметрового диапазона» //Вестник РАУ (серия: физико-математические и естественные науки) № 2, 2023, С. 29-37.
3. S. Tadevosyan “Modification of photosensor for the antenna near-field measurements in the millimeter waveband” 2022, IET Conference Proceedings, Issue 15, p. 26-28.

ԹԱԳԵՎՈՍՅԱՆ ՍՈՒՍԱՆՆԱ ՌԱՖԻԿԻ

ՄԻԼԻՄԵՏՐԱԿԱՆ ՏԻՐՈՒԹԻ ԱՆՏԵՆԱՆԵՐԻ ՄՈՏԱԿԱ ԴԱՇՏԻ ԱՎՏՈՄԱՏ ԶԱՓՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ԿԻՐԱՌՎՈՂ ՁՈՆԴԻ ԴԻՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ և ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից կապի և ռադիոլուսացիոն համակարգերում միլիմետրական տիրույթի հաճախականությունների աճող կիրառումը զգալիորեն բարձրացրել է անտենաների չափումների ճշգրտությանը ներկայացվող պահանջները: Քանի որ այս հաճախականային տիրույթում ալիքի երկարությունը կազմում է ընդամենը մի քանի միլիմետր, նույնիսկ չափիչ զոնդի դիրքավորման փոքր սխալանքները կարող են նկատելիորեն ազդել անտենայի վերականգնված բնույթագրերի վրա: Գոյություն ունեցող դիրքավորման համակարգերի մեխանիկական բացատները (յուֆտերը), հաղորդակի իներցիան և սահմանափակ ճկունությունը նվազեցնում են չափումների ճշգրտությունն ու կրկնելիությունը՝ ավտոմատ կառավարման առաջադեմ համակարգերի (ԱԿՀ) մշակումը դարձնելով կարևոր գիտահետազոտական խնդիր:

Ատենախոսության նպատակն է միլիմետրական տիրույթի հաճախականություններում անտենաների մոտակա դաշտի ավտոմատացված չափումների համար չափիչ զոնդի դիրքավորման բարձր ճշգրտության սարքերի, ավտոմատ կառավարման համակարգի (ԱԿՀ) և կառավարման ալգորիթմների մշակումն ու հետազոտումը: Հետազոտությունը ներառում է անտենային չափումների գոյություն ունեցող մեթոդների վերլուծությունը, ճեղքավոր պարբերական կառուցվածքներով ֆոտոէլեկտրական ցուցիչների հիման վրա զոնդի դիրքավորման երկառնաճիգ համակարգի մշակումը, զոնդի հետադարձ-առաջընթաց շարժման էլեկտրոնային կառավարման համակարգի նախագծումը, սկանավորման գոտու էլեկտրոնային կառավարումն ապահովող ալգորիթմի ներդրումը և դիրքավորման ճշգրտության փորձարարական գնահատումը:

Աշխատանքի գիտական նորույթը կայանում է ավտոմատ կառավարման նոր ճարտարապետության մշակման մեջ, որն ինտեգրում է ծրագրային ապահովումը տվյալների հավաքագրման ժամանակակից սարքավորումների հետ՝ անտենաների մոտակա դաշտի պլանար (հարթային) չափումների համար: Նախագծվել են դիրքավորման նոր ֆոտոէլեկտրական համակարգ և զոնդի հետադարձ-առաջընթաց շարժման էլեկտրոնային կառավարման համակարգ: Բացի այդ, առաջարկվել է ալգորիթմ, որն ապահովում է սկանավորման գոտու էլեկտրոնային կառավարումը՝ չափիչ համալիրի աշխատանքի անընդհատ վերահսկողության հետ համատեղ:

Հետազոտության տեսական նշանակությունը կայանում է միլիմետրական տիրույթի անտենաների չափիչ կայանքների ավտոմատ կառավարման համակարգերի նախագծման սկզբունքների ընդլայնման մեջ: Գործնական նշանակությունը

հիմնավորվում է անտենային ավտոմատացված չափիչ համալիրներում մշակված տեխնիկական և ծրագրային լուծումների կիրառման հնարավորությամբ՝ դիրքավորման ճշգրտության, չափումների հուսալիության և գործառնական ճկունության բարձրացման նպատակով: Մշակված տեխնիկական լուծումներից մեկը պաշտպանվել է Հայաստանի Հանրապետության թիվ 2026.01 արտոնագրով (ՄԴԿ G01R 29/10)՝ «Սարք անտենայի բացվածքում դաշտի բաշխման չափման համար»:

Առաջարկվող մեթոդներն իրականացվել են LabVIEW-ի, միկրոկոնտրոլերային հիմքով սարքավորումների և տվյալների հավաքագրման ժամանակակից սարքերի կիրառմամբ: Դրանց արդյունավետությունը ստուգվել է փորձարարական ճանապարհով՝ հատուկ չափիչ կայանքի միջոցով: Ստացված արդյունքները ներկայացվել են մի շարք միջազգային և հանրապետական գիտական կոնֆերանսներում և հրատարակվել վեց գիտական հոդվածներում, այդ թվում՝ Scopus շտեմարանում ինդեքսավորվող մեկ անհատական հեղինակային հոդվածում և մեկ գյուտի արտոնագրում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները ներառում են.

- անտենային ավտոմատացված չափիչ համալիրի ավտոմատ կառավարման համակարգի ճարտարապետությունը.
- անտենային ավտոմատացված չափումների կառավարման ալգորիթմը.
- զոնդի դիրքավորման ճշգրտության և դրա բարելավման մեթոդների վերաբերյալ փորձարարական արդյունքները.
- միլիմետրական տիրույթի անտենաների չափումների հուսալիության բարձրացման տեխնիկական լուծումները:

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PROBE POSITIONING DEVICES
FOR AUTOMATIC NEAR-FIELD MEASUREMENTS OF MILLIMETER-RANGE
ANTENNAS**

SUMMARY

The increasing use of millimeter-wave (mmWave) frequencies in modern communication and radar systems has significantly increased the accuracy requirements for antenna measurements. Because the wavelength in this frequency range is only a few millimeters, even small positioning errors of the measurement probe may noticeably affect the reconstructed antenna characteristics. Mechanical backlash, drive inertia, and limited flexibility of existing positioning systems reduce measurement accuracy and repeatability, making the development of advanced automatic control systems an important research task.

The aim of this dissertation is to develop and investigate high-precision probe positioning devices, an automatic control system, and control algorithms for automated near-field antenna measurements in the millimeter-wave frequency range. The research includes the analysis of existing antenna measurement techniques, the development of a two-axis probe positioning system based on photoelectric sensors with periodic slotted structures, the design of an electronic control system for reciprocating probe motion, the implementation of an algorithm providing electronic control of the scanning area, and the experimental evaluation of positioning accuracy.

The scientific novelty of the work lies in the development of a new automatic control architecture that integrates software with modern data acquisition hardware for planar near-field measurements. A novel photoelectric positioning system and an electronic control system for reciprocating probe motion have been designed. In addition, an algorithm providing electronic control of the scanning area together with continuous monitoring of the measurement complex has been proposed.

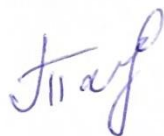
The theoretical significance of the research consists in extending the design principles of automatic control systems for millimeter-wave antenna measurement facilities. The practical significance is demonstrated by the possibility of applying the developed hardware and software solutions in automated antenna measurement complexes to improve positioning accuracy, measurement reliability, and operational flexibility. One of the developed technical solutions has been protected by the Patent of the Republic of Armenia No. 2026.01 (IPC G01R 29/10), "Device for Measuring the Field Distribution in an Antenna Aperture."

The proposed methods were implemented using LabVIEW, microcontroller-based hardware, and modern data acquisition devices. Their effectiveness was verified

experimentally using a dedicated measurement setup. The obtained results have been presented at several international and national scientific conferences and published in six scientific papers, including one single-author article indexed in Scopus and one invention patent.

The main contributions submitted for defense include the architecture of the automatic control system for an automated antenna measurement complex, the control algorithm for automated antenna measurements, the experimental results on probe positioning accuracy and methods for its improvement, as well as technical solutions for increasing the reliability of millimeter-wave antenna measurements, presented at several international and national scientific conferences and published in six scientific papers, including one single-author article indexed in Scopus and one invention patent.

The main contributions submitted for defense include the architecture of the automatic control system for an automated antenna measurement complex, the control algorithm for automated antenna measurements, the experimental results on probe positioning accuracy and methods for its improvement, as well as technical solutions for increasing the reliability of millimeter-wave antenna measurements.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'T. A. G.', is located in the lower right quadrant of the page.