Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.317.08

Зокиров Даврон Тулкин угли

Информационно-измерительная система СВЧ-диапазона с сетевыми возможностями

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра наук по специальности 6-05-0611-03 – искусственный интеллект

Научный руководитель:
Гусинский А.В.,
кандидат технических наук, доцент

Минск 2026

Краткое введение

В настоящее время наблюдается устойчивый рост требований к точности и воспроизводимости СВЧ-измерений, который сопровождается возрастающей потребностью в использовании распределённых и дистанционных измерительных систем. Сетевые условия, аппаратная синхронизация времени (PTP, GNSS/PPS) и облачные сервисы открывают новые возможности для организации измерений, однако одновременно требуют решения комплекса задач, связанных с управлением неопределённостью, защитой целостности данных и обеспечением трассируемости получаемых результатов к государственным эталонам.

В существующей научно-технической литературе рассмотрены отдельные подходы к синхронизации измерительных узлов, буферизации данных при сетевых сбоях, защите передаваемой информации, а также практики обеспечения качества программного обеспечения. Несмотря на это, остаются нерешёнными задачи интеграции метрологических требований в распределённую сетевую архитектуру, формализации процедур верификации системы при участии компонентов машинного обучения, а также разработки рабочих регламентов для полевых (нестационарных) условий эксплуатации.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка методологической и практической основы для создания метрологически корректной дистанционной информационно-измерительной системы в СВЧ-диапазоне, обеспечивающей требуемые показатели точности, воспроизводимости и безопасности при реальных сетевых условиях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– Проведен анализ принципов функционирования информационно-измерительной системы СВЧ диапазона, разработаны ее структурная схема и регламент работы.

– Разработана и формализована методика калибровки информационно-измерительной системы, включая описание операций, средств, условий проведения и обработки результатов измерений.

– Исследован и реализован подход к дистанционной калибровке, разработаны алгоритмы ее выполнения, а также программное обеспечение с клиент-серверной архитектурой.

– Проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик системы, оценены точность и достоверность результатов калибровки в различных режимах измерений.

– Спроектирована аппаратно-программная архитектура информационно-измерительной системы с сетевыми возможностями, включая механизмы обмена данными и процедуры тестирования.

– Исследованы возможности интеграции технологий искусственного интеллекта в процессы калибровки информационно-измерительных систем СВЧ-диапазона. Разработан прототип цифрового двойника процесса калибровки на основе открытых семантических технологий, включая структуру базы знаний и примеры представления знаний в виде семантических сетей.

Объектом исследования является дистанционная информационно-измерительная система для радиомониторинга и метрологических измерений в СВЧ-диапазоне. Предметом исследования выступают архитектурные решения, методы синхронизации и обработки данных, процедуры верификации и регламенты эксплуатации, обеспечивающие метрологическую корректность и безопасность функционирования системы.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода к калибровке информационно-измерительных систем СВЧ диапазона, основанного на сочетании дистанционных технологий и методов интеллектуальной обработки знаний. Впервые предложено использование цифрового двойника процесса калибровки, реализованного на основе открытых семантических технологий, обеспечивающего формализованное представление параметров, структуры системы и процедур калибровки в едином семантическом пространстве. Разработаны модели и алгоритмы дистанционной калибровки с клиент-серверной архитектурой, а также структура базы знаний, позволяющая интегрировать разнородные данные, поддерживать интеллектуальный анализ и расширяемость системы.

Практическая значимость работы заключается в создании методического, программного и архитектурного обеспечения, позволяющего повысить точность, воспроизводимость и эффективность процессов калибровки информационно-измерительных систем. Реализованные решения обеспечивают возможность дистанционного проведения калибровки, сокращения временных и ресурсных затрат, а также повышения надежности эксплуатации оборудования за счет предиктивной диагностики. Предложенный цифровой двойник и соответствующая база знаний могут быть использованы для автоматизации процессов калибровки, обучения персонала и интеграции с современными интеллектуальными и промышленными системами.

В ходе выполнения работы были применены следующие методы исследования: системный анализ и синтез архитектур, метрологический расчёт бюджета неопределённости, моделирование сетевых сценариев, статистическая обработка экспериментальных данных, методы

проектирования программного обеспечения (микросервисная архитектура, CI/CD), а также практики обеспечения информационной безопасности (HSM/PKI, ротация ключей, журналирование).

Результатом настоящей диссертационной работы является готовое проектное решение и комплект документов для реализации метрологически корректной дистанционной информационно-измерительной системы, прошедшей проверку в моделируемых и полевых условиях. Дополнительно разработаны рекомендации для прохождения аккредитации, пилотного развёртывания и дальнейшего масштабирования предложенного подхода.

Общая характеристика работы

Целью работы является разработка методологической и практической основы для создания метрологически корректной дистанционной информационно-измерительной системы СВЧ-диапазона, обеспечивающей требуемые показатели точности, воспроизводимости и безопасности в реальных сетевых условиях. В работе выполнен комплексный анализ принципов функционирования таких систем, разработаны методика и алгоритмы калибровки, реализована архитектура дистанционной калибровки с клиент-серверным взаимодействием, проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик, а также предложено использование технологий искусственного интеллекта в виде цифрового двойника процесса калибровки на основе семантических моделей знаний. Полученные результаты представляют собой завершённое инженерно-методическое решение, ориентированное на практическое внедрение, повышение эффективности калибровочных процедур и развитие интеллектуальных измерительных систем.

Связь работы с приоритетными направлениями исследований

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства» согласно пункту 1 перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утверждённых Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020.

Личный вклад

Диссертационное исследование является квалификационной научной работой, выполненной самостоятельно на основе изучения отечественной и иностранной литературы, сравнительного анализа существующих

программных решений и проведения комплекса натурных вычислительных экспериментов.

Личный вклад автора заключается в следующем:

– Выполнен анализ принципов функционирования информационно-измерительных систем СВЧ диапазона и разработана их структурная модель и регламент работы.

– Разработана и формализована методика калибровки информационно-измерительной системы, включая полный цикл процедур от подготовки до оформления результатов.

– Предложен и реализован подход к дистанционной калибровке, включая разработку алгоритмов и программного обеспечения с клиент-серверной архитектурой.

– Спроектирована аппаратно-программная архитектура системы с поддержкой сетевого взаимодействия и обеспечением метрологической корректности.

– Проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик системы и выполнена оценка точности и достоверности результатов.

– Исследованы и реализованы подходы к интеграции методов искусственного интеллекта в процессы калибровки.

– Разработан прототип цифрового двойника процесса калибровки на основе открытых семантических технологий, включая структуру базы знаний и примеры ее наполнения.

– Сформулированы рекомендации по практическому внедрению, масштабированию и обеспечению надежной эксплуатации разработанной системы.

Апробация и публикации

Результаты исследований были представлены в виде докладов на научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР 2025-2026 годов. Опубликовано 2 работы:

– 1. Зокиров, Д. Т. Методики дистанционной калибровки информационно-измерительной системы СВЧ диапазона = Methodologies for distance calibration of microwave range information and measurement systems / Д. Т. Зокиров // Информационная безопасность : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апреля 2025 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2025. – С. 158–161.

– 2. Зокиров, Д. Т. Аппаратно-программная архитектура информационно-измерительной системы с сетевыми возможностями / Д. Т. Зокиров // Информационная безопасность : сборник материалов 62-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 13–17 апреля 2026 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: С. В. Дробот (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2026. – С. 241–242.

Краткое содержание работы

Во введении даётся обоснование актуальности работы, связанное с ростом требований к точности СВЧ-измерений и острой потребностью в высокопроизводительных системах дистанционной калибровки. Описываются прикладные задачи, в которых может быть использована разработанная система, и приводится краткий обзор проблематики.

В первой главе произведён системный анализ существующих методологических подходов и программных инструментов. Приведена специфика СВЧ-измерений как объекта метрологического контроля. Описан принцип действия и структурная схема информационно-измерительной системы.

Во второй главе приведено описание методики калибровки системы. Детально описаны операции калибровки, средства измерений, требования безопасности и нормальные условия проведения. Приведены модели измерения и методы расчёта неопределённости.

В третьей главе рассмотрена дистанционная калибровка как перспективное направление развития метрологического обеспечения. Представлена структурная схема, разработан алгоритм проведения на основе технологии «клиент-сервер», описана разработка программного обеспечения в среде LabVIEW.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик системы. Измерения выполнялись при нормальных условиях для двух крайних частот рабочего диапазона (78,33 ГГц и 118,1 ГГц) и значений КСВН (1,4 и 2,0) и ослабления (5–40 дБ). Для каждого из пяти типов калибровочных процедур получены результаты измерений, рассчитаны стандартные неопределённости и составлены бюджеты неопределённости.

В пятой главе спроектирована аппаратно-программная архитектура системы с сетевыми возможностями. Определены минимальные и рекомендованные аппаратные интерфейсы, требования к аппаратной синхронизации времени, форматы и протоколы обмена. Особое внимание

уделено локальной буферизации, политике управления ключами и использованию защищённых элементов.

В шестой главе рассматривается подход к созданию цифрового двойника процесса калибровки устройств на основе технологии OSTIS, в рамках которого в единой базе знаний формализуются измеряемые параметры, структура устройства и все этапы калибровки. Показано, что такой цифровой двойник служит не только средством структурированного представления знаний, но и основой для интеллектуальной поддержки: анализа и оптимизации процессов, автоматизации с применением гибридных методов ИИ, предиктивной диагностики состояния оборудования, а также обучения пользователей с возможностью естественно-языкового взаимодействия. Рассмотрены фрагменты структуры базы знаний цифрового двойника, а также примеры описания отдельных видов знаний на языке семантических сетей. Разработанные фрагменты служат основой для дальнейшего развития цифрового двойника.

В заключении приведён краткий обзор результатов, полученных на каждом этапе исследования. Даётся подтверждение того, что разработанная система успешно функционирует как инструмент поддержки принятия решений при дистанционной калибровке, и приводится описание перспектив дальнейшей разработки.

Заключение

В диссертационной работе выполнена комплексная проработка проектирования, реализации и метрологического обеспечения дистанционной информационно-измерительной системы (ИИС) СВЧ-диапазона с сетевыми возможностями. Работа охватила технические, метрологические, программно-аппаратные и организационные аспекты, необходимые для создания надёжной, воспроизводимой и безопасной платформы проведения удалённых измерений и калибровок.

К основным результатам работы относятся следующие:

Разработана методика калибровки ИИС СВЧ-диапазона (глава 2), соответствующая требованиям ТКП 8.014-2012. Определены операции, средства измерений, условия и процедуры калибровки для определения отклонений частоты, КСВН, ослабления, фазы коэффициентов отражения и передачи. Предложены модели измерения и бюджеты неопределённости, что обеспечивает метрологическую прослеживаемость к Национальному эталону времени и частоты.

Создана система дистанционной калибровки на основе технологии «клиент-сервер» (глава 3). Разработаны обобщённая структурная схема,

алгоритм проведения калибровки и специализированное программное обеспечение (в среде LabVIEW), позволяющее исключить транспортировку средств измерений в лабораторию, сократить сроки и стоимость калибровочных услуг при сохранении требуемой точности.

Экспериментально подтверждены метрологические характеристики системы (глава 4). В нормальных условиях для двух крайних частот рабочего диапазона (78,33 ГГц и 118,1 ГГц) и типовых значений параметров (КСВН = 1,4 и 2,0; ослабление 5–40 дБ) получены количественные оценки стандартных и расширенных неопределённостей, составлены бюджеты неопределённости для пяти типов калибровочных процедур, что подтвердило работоспособность разработанной методики.

Предложена аппаратно-программная архитектура ИИС с сетевыми возможностями (глава 5), обеспечивающая метрологическую корректность, отказоустойчивость, безопасность и модульность. Определены ключевые принципы: учёт сетевых факторов в бюджете неопределённости, аппаратная синхронизация времени (PTP/GPS PPS), локальная буферизация данных (не менее 24 часов), защита каналов связи (mTLS/TLS), цифровая подпись результатов и аудит операций. Разработаны обязательные технические требования, KPI (RTT, потери пакетов, джиттер, точность синхронизации) и поведение при авариях.

Предложен подход к интеграции технологий искусственного интеллекта в процессы калибровки информационно-измерительных систем СВЧ-диапазона путем построения цифрового двойника (глава 6), в рамках которого в единой базе знаний формализуются измеряемые параметры, структура устройства и все этапы калибровки. Показано, что такой цифровой двойник служит не только средством структурированного представления знаний, но и основой для интеллектуальной поддержки: анализа и оптимизации процессов, автоматизации с применением гибридных методов ИИ, предиктивной диагностики состояния оборудования, а также обучения пользователей с возможностью естественно-языкового взаимодействия. Рассмотрены фрагменты структуры базы знаний цифрового двойника, а также примеры описания отдельных видов знаний на языке семантических сетей. Разработанные фрагменты служат основой для дальнейшего развития цифрового двойника.

Научная новизна работы заключается в интеграции метрологических требований в архитектуру распределённой информационно-измерительной системы, формализации метаданных и контрактов данных, обеспечивающих трассируемость результатов, а также в разработке подхода к интеграции технологий искусственного интеллекта в процессы калибровки

информационно-измерительных систем СВЧ-диапазона путем построения цифрового двойника на базе открытых семантических технологий.

Практическая значимость состоит в создании готового проектного решения и комплекта документов для реализации метрологически корректной дистанционной ИИС СВЧ-диапазона, включая методику калибровки, архитектуру, регламенты и программное обеспечение. Полученные результаты могут быть применены при промышленной разработке систем радиомониторинга, подготовке документов для аккредитации измерительной лаборатории, а также при создании эксплуатационной документации для полевых условий.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1–А. Зокиров, Д. Т. Методики дистанционной калибровки информационно-измерительной системы СВЧ диапазона = Methodologies for distance calibration of microwave range information and measurement systems / Д. Т. Зокиров // Информационная безопасность : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апреля 2025 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2025. – С. 158–161.

2–А. Зокиров, Д. Т. Аппаратно-программная архитектура информационно-измерительной системы с сетевыми возможностями / Д. Т. Зокиров // Информационная безопасность : сборник материалов 62-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 13–17 апреля 2026 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: С. В. Дробот (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2026. – С. 241–242.