

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## **Ծառուրյան Գրիգոր Արմենի**

ԳԵՐԼԱՅՆԱՇԵՐՏ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅՈՒՄ ՕԳՏԱԳՈՐԾՎՈՂ  
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ  
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

**Շառուրյան Գրիգոր Արմենի**

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**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. Մարտին Յուլակի Այվազյան տ.գ.թ. Ահարոն Կամոյի Ահարոնյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. հունիսի 27-ին, ժամը 12<sup>00</sup>-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. Мартин Цолакович Айвазян к.т.н. Агарон Камоевич Агаронян
Ведущая организация:	Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 27-го июня 2025г. в 12<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета 046 – “Радиотехника и электроника”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПТУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

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

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

Бениамин Феликсович Бадалян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Сверхширокополосные (Ultra-Wideband — UWB) технологии, обладающие полосой пропускания сигнала 500 МГц, получили широкое применение в современных радиотехнических системах. Основными преимуществами таких систем являются определение расстояния с точностью до сантиметров, высокая устойчивость к интерференции, малое время задержки и низкая мощность используемых сигналов. Сверхширокополосная технология IEEE 802.15.4z представляет собой стандарт беспроводной связи для коротких расстояний, в котором используются частоты от 3,1 до 10,6 ГГц. Сверхширокополосными считаются такие системы, у которых полоса пропускания сигнала составляет 20% от центральной частоты или превышает 500 МГц.

UWB технология IEEE 802.15.4z имеет значительные преимущества по сравнению со своими конкурентами, такими как радиолокационные системы и другие технологии точного позиционирования. UWB технология является оптимальным решением для задач определения местоположения и детектирования в реальном времени, что делает её применимой как в потребительской электронике, так и для контроля оборудования на заводах и в производственных процессах. Когда два IEEE 802.15.4z UWB устройства находятся на достаточно близком расстоянии для установления соединения, они начинают измерять своё взаимное положение и расстояние друг от друга, используя принцип измерения времени распространения сигнала. Посылая импульс от одного устройства к другому и измеряя время его распространения, эти устройства могут с высокой точностью определить своё положение и расстояние между собой. Это особенно важно в закрытых помещениях, где работа GPS систем зачастую ограничена или невозможна. Благодаря короткой длительности передачи и малому размеру передаваемых пакетов, UWB технология широко применяется в системах, где требуются минимальная задержка и высокая скорость отклика. Низкая спектральная плотность мощности UWB технологии позволяет свести к минимуму помехи сигнала, а также усложняет его обнаружение, что придаёт дополнительную безопасность передаче данных. Эти преимущества способствуют широкому применению интегральных схем IEEE 802.15.4z UWB в автомобильной отрасли, смартфонах, технологиях “умного дома”, а также в приложениях, требующих высокой точности позиционирования в закрытых помещениях.

Распространение технологии IEEE 802.15.4z UWB вызывает большой спрос на тестирование используемых в ней интегральных схем. Интегральные схемы, представленные в индустрии для реализации функциональности UWB, создают ряд проблем при тестировании. Они связаны с тем, что UWB технология работает на высоких частотах — до 10,6 ГГц, обладает широкой полосой частот, а также использует сложные схемы модуляции. Эффективная тестовая платформа должна обладать достаточной гибкостью и масштабируемостью для анализа таких частот и полос пропускания. Кроме того, необходима высокая вычислительная мощность для качественной обработки и анализа полученных результатов тестирования.

Подобные требования создают необходимость совершенствования и улучшения систем тестирования, существующих в индустрии, для обеспечения точной, эффективной верификации и интеграции UWB интегральных схем в различные области применения.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является изучение, разработка и усовершенствование систем тестирования и измерений интегральных схем, используемых в сверхширокополосных технологиях.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- Изучены принципы работы, структура пакетов и радиочастотные параметры сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z.
- Изучены существующие в индустрии измерительные системы и особенности тестирования интегральных схем сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z.
- С целью расширения применимости тестовой системы и сокращения затратных процессов в программной среде LabVIEW разработан алгоритм для улучшения измерений величины векторной ошибки (Error Vector Magnitude – EVM) в стандарте WiFi.
- Проведено исследование по методикам измерений и разработке алгоритмов, характерных для сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z.
- Разработан метод эффективного использования памяти для генерации пакетов, применяемых в сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z, что способствует сокращению времени тестирования.
- Разработана система тестирования, которая позволяет проводить измерения времени распространения сигнала (Time of Flight - ToF), характерные для UWB технологии.
- Разработан метод калибровки системы тестирования для повышения точности измерений времени распространения сигнала.
- С использованием разработанной системы тестирования проведены измерения на интегральных схемах марок DW1000, DW3000 и SR150.
- С использованием разработанной системы тестирования проведены интерференционные измерения сигналов UWB и WiFi7.

**Научная новизна.** В процессе выполнения работы были получены следующие научные результаты:

- Предложена система тестирования сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z. Показано, что с помощью предлагаемой системы тестирования возможно осуществить улучшение спектральных измерений и измерений точности модуляции для стандартов UWB и WiFi.
- Представлен метод спектральных измерений, который позволяет в шумовой среде улучшить значения измерений мощности соседнего канала для UWB интегральных схем на 2.5 дБ. Основой данного улучшения является разработанный алгоритм синхронизированного приема сигналов.
- Разработан метод генерации сигналов для стандарта IEEE 802.15.4z UWB, обеспечивающий временные интервалы между пакетами с эффективным использованием памяти. Доказано, что данный метод значительно сокращает время генерации пакетов и тестирования интегральных схем. В случае тестирования 100 интегральных схем время генерации необходимых пакетов было сокращено на 26.4 часа.
- Предложена система тестирования, позволяющая осуществлять измерения времени распространения сигнала. Разработан метод калибровки, позволяющий исключить погрешности, вносимые радиочастотными компонентами системы, из результатов измерений расстояния без использования векторных анализаторов цепей.

### **Практическая ценность работы.**

- Разработанная система тестирования может быть использована для тестирования интегральных схем стандарта IEEE 802.15.4z UWB и других стандартов беспроводной связи, а также для проведения интерференционных измерений.
- Разработанные алгоритмы спектральных измерений могут быть использованы для проведения измерений в шумовых средах.
- Разработанный метод генерации сигнала с обеспечением интервала между пакетами с эффективным использованием памяти для стандарта IEEE 802.15.4z UWB, может быть использован для сокращения времени тестирования интегральных схем.
- Разработанный метод калибровки системы тестирования может быть использован для повышения точности измерений времени распространения сигнала.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена наличием разработанной системы тестирования и программного обеспечения. Результаты измерений, выполненных с помощью системы тестирования, подтверждают работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- С разработанной системой тестирования проводились измерения, специфичные для стандарта IEEE 802.15.4z UWB. Распиряя функциональные возможности этой системы, осуществлялись улучшение измерений EVM для стандарта WiFi7.
- С использованием предлагаемой системы тестирования, при обеспечения условия синхронного приёма сигналов, было осуществлено улучшение спектральных измерений в условиях шумовой среды.
- Разработанный метод генерации сигналов с обеспечением интервала между пакетами с эффективным использованием памяти значительно сократил время генерации UWB пакетов и время тестирования интегральных схем.
- С помощью разработанного метода калибровки испытательной системы были устранены погрешности, вносимые радиочастотными компонентами системы, из измерений времени распространения сигнала.
- С помощью разработанной системы тестирования была проведена оценка интерференционного воздействия сигналов стандарта WiFi7 на работу IEEE 802.15.4z сверхширокополосной технологии.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано шесть научных работ, одна из которых опубликована в базе данных Scopus, а две из них опубликованы без соавторов. Полный список работ приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 104 наименования. Основной текст работы изложен на 127 страницах, включая 109 рисунков и 5 таблиц. 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** проведен анализ сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z, описан принцип её работы и изучены используемые радиочастотные параметры.

UWB технология является одним из самых перспективных решений в современных системах беспроводной связи и позиционирования. Она широко применяется в таких областях, как автомобильная промышленность, смартфоны и потребительская электроника, технологии “умного дома”, навигация в закрытых помещениях, автоматизация производства и складских процессов, а также в системах безопасности.

Применение UWB технологии обусловлено высокой точностью передачи данных, измерением расстояния с сантиметровой точностью и устойчивостью к интерференционным помехам. UWB использует низкий уровень мощности:  $-40$  дБм/МГц, что позволяет использовать данный стандарт параллельно с другими стандартами беспроводной связи, не создавая при этом интерференционных искажений (рис. 1).

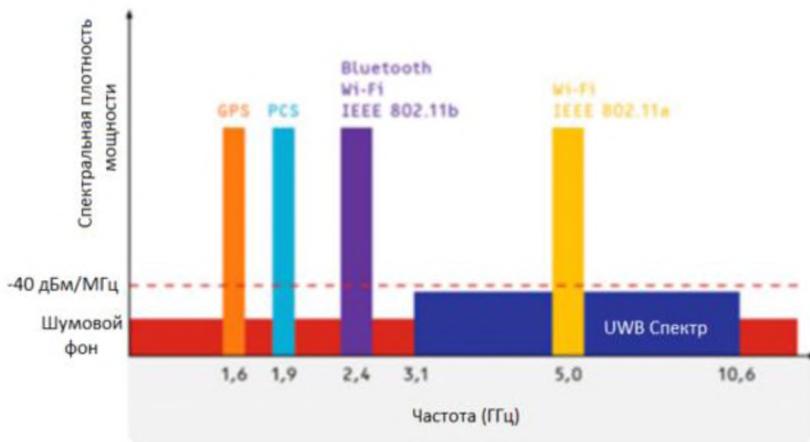


Рис. 1. Спектральное распределение узкополосных и UWB сигналов

В сверхширокополосной технологии определение расстояния осуществляется на основе детектирования времени распространения сигнала (Time of Flight — ToF). Детектирование ToF может быть реализовано методом DS-TWR (Double-Sided Two-Way Ranging), в основе которого лежит обмен пакетами между двумя устройствами. Первое устройство передает пакет, содержащий специальный маркер. Второе устройство, приняв этот пакет и определив положение маркера, может определить время распространения сигнала по разнице времени между отправленным и принятым маркерами. Для минимизации ошибок, возникающих из-за отклонений тактовых генераторов устройств, осуществляется дополнительный обмен пакетами между первым и вторым, а также между вторым и первым устройствами (рис. 2).

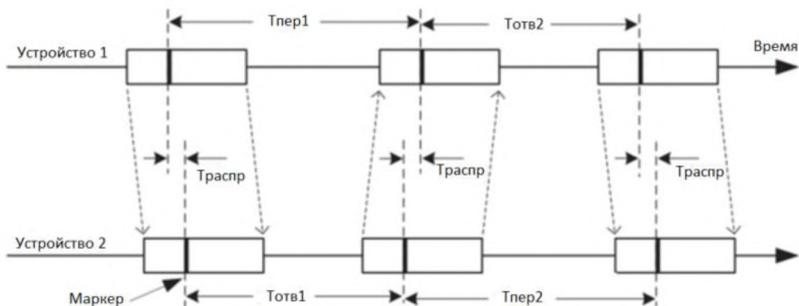


Рис. 2. Определение времени распространения сигнала методом DS-TWR

На рисунке введены следующие обозначения:  $T_{расп}$  - время распространения сигнала;  $T_{пер1}$  и  $T_{пер2}$  - соответственно временные разницы между передачей и приёмом маркера у первого и второго устройств;  $T_{отв1}$  и  $T_{отв2}$  - временные разницы между приёмом и передачей маркера у второго и первого устройств соответственно. Упростив схему на рисунке и сделав следующие обозначения:  $\alpha a = T_{пер1}$ ,  $ab = T_{отв2}$ ,  $\beta c = T_{отв1}$ ,  $\beta d = T_{пер2}$ ,  $t = T_{расп}$ ,  $(\alpha + \beta)/2 = 1$ , получаем систему (1) и рис. 3.

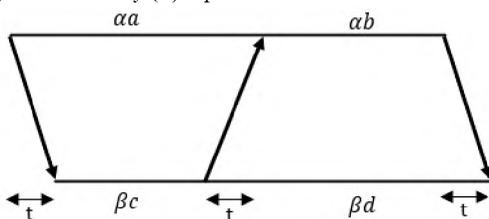


Рис. 3. Эквивалентная схема метода DS-TWR

$$\begin{cases} \alpha a = 2t + \beta c, \\ \beta d = 2t + ab, \\ \frac{\alpha + \beta}{2} = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  - это ошибки, внесённые тактовыми генераторами, значения которых находятся в диапазоне от 0,99998 до 1,00002. Решая систему (1) относительно  $t$ , получаем

$$t = \frac{da - bc}{b + d + a + c}. \quad (2)$$

Возвращаясь от обозначений, получим время распространения сигнала:

$$T_{расп} = \frac{T_{пер1} * T_{пер2} - T_{отв1} * T_{отв2}}{T_{пер1} + T_{пер2} + T_{отв1} + T_{отв2}}. \quad (3)$$

Расстояние до объекта будет

$$d = T_{расп} * c, \quad (4)$$

где  $c$  - скорость света.

На рис. 4 представлен пример импульса, соответствующего UWB стандарту - слева, эталонного импульса - по центру, и результат их взаимной корреляции - справа.

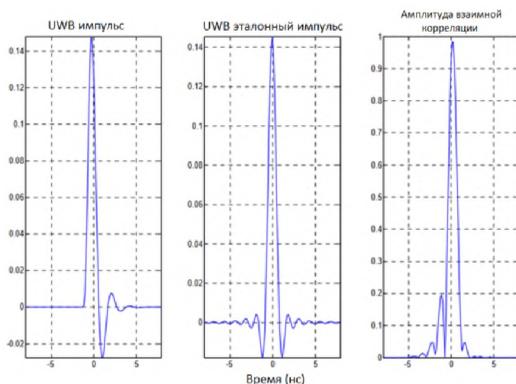


Рис. 4. Вид импульсов, соответствующих стандарту UWB

UWB технология использует частоты, указанные на рис. 5, где обязательными каналами являются: канал 0 - для диапазона ниже 1 ГГц, канал 3 - для низкочастотного диапазона и канал 9 - для высокочастотного диапазона.

Частотная группа	Номер канала	Несущая частота [МГц]	Полоса частот [МГц]
0	0	499.2	499.2
1	1	3494.4	499.2
	2	3993.6	499.2
	3	4492.8	499.2
	4	3993.6	1331.2
2	5	6489.6	499.2
	6	6988.8	499.2
	7	6489.6	1081.6
	8	7488.0	499.2
	9	7987.2	499.2
	10	8486.4	499.2
	11	7987.2	1331.2
	12	8985.6	499.2
	13	9484.8	499.2
	14	9984.0	499.2
	15	9484.8	1354.97

Рис. 5. Каналы UWB

**Во второй главе** проведён анализ существующих в индустрии систем тестирования сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z, исследованы особенности и сложности тестирования UWB интегральных схем, а также осуществлен выбор тестовой платформы.

Технология сверхширокополосной связи переходит к этапу массового внедрения. Компании и специалисты, работающие в этой области, понимают, что для её успешного развития необходимо наличие совместимой, целостной и взаимосвязанной экосистемы. С этой целью был создан консорциум FiRa, который помогает компаниям оперативно решать задачи, связанные с экосистемой и обеспечением совместимости, предлагая комплексные решения, технические спецификации для тестирования и стандарты. FiRa подчёркивает уникальные возможности сверхширокополосной технологии - беспрецедентную точность и безопасность при измерении расстояния и определении положения объектов. В состав консорциума FiRa входят такие компании, как Apple, Bosch, Cisco, Google, NXP, Qorvo, Qualcomm, Huawei, Infineon, Mediatek, Mitsubishi Electric, Renesas, Sony, ST и другие. FiRa определяет перечень верифицированных

систем тестирования UWB, которые могут использоваться для проверки соответствия (conformance) на уровнях PHY и MAC. В таблице 1 представлены системы тестирования, сертифицированные для проверки соответствия на уровне PHY.

Таблица 1. Системы тестирования UWB, определённые консорциумом FiRa

Производитель	Модель
LitePoint	IQgig-UWB
LitePoint	IQgig-UWB+
Rohde & Schwarz	CMP200
National Instruments	VST 2nd generation, PXIe-583x
National Instruments	VST 3rd generation, PXIe-5842
Keysight	VXT-M941xA
Welzet	T6290F

В данной работе разработка системы тестирования и улучшение измерений интегральных схем, используемых в технологии UWB, осуществлялись на базе существующей системы тестирования UWB компании National Instruments. Для тестирования интегральных схем, работающих в высокочастотном диапазоне, система тестирования должна обеспечивать возможность работы на частоте 7987,2 МГц. Кроме того, она должна обеспечивать мгновенную пропускную способность не менее 499,2 МГц. Всем этим требованиям соответствует векторный приёмопередатчик PXIe-5831 (Vector Signal Transceiver – VST) производства компании National Instruments.

Другой вызов, возникающий в процессе тестирования UWB интегральных схем, заключается в том, что система тестирования должна обеспечивать возможность проведения измерений также в соответствии с другими стандартами беспроводной связи. Это связано с тем, что в составе интегральных схем, помимо чипов стандарта UWB, могут присутствовать и чипы, работающие по таким стандартам, как Wi-Fi и Bluetooth. В рамках диссертационной работы были рассмотрены измерения показателя векторной ошибки (Error Vector Magnitude – EVM) для стандарта Wi-Fi, а также проведены исследования, направленные на повышение эффективности этих измерений. Поскольку диапазоны частот стандарта Wi-Fi 7 охватывают также области 5 и 6 ГГц, векторный приёмопередатчик PXIe-5831 может быть применён для проведения измерений в данном стандарте. В диссертационной работе исследована возможность применения метода кросс-корреляции для измерения величины векторной ошибки. Этот метод позволяет устранять шумы анализатора из измерений и получать более низкий порог измерения величины векторной ошибки за счёт использования двух радиочастотных векторных анализаторов.

На рис. 6 показана система измерения EVM с методом кросс-корреляции, в которой используются два векторных приёмопередатчика PXIe-5831. Тракт передачи IF0 первого NI PXIe-5831 подключен к входу делителя, а выходы делителя - к трактам приёмопередатчиков IF1. Оба приёмопередатчика используют один и тот же гетеродин: выход гетеродина первого PXIe-5831 (LO2out) подключен к входу смесителя второго PXIe-5831 (LO2in).

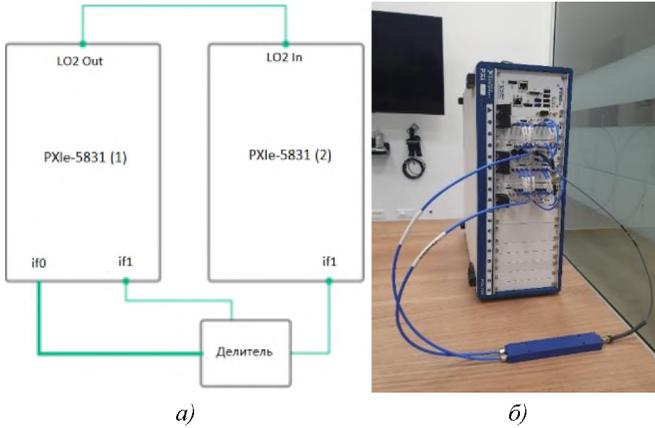


Рис. 6. Блок-схема измерительной системы методом кросс-корреляции (а) и внешний вид передней панели измерительной системы методом кросс-корреляции (б)

Результаты EVM, показанные на рис. 7, проведенные методом кросс-корреляции, показывают, что пороговый EVM уровень системы достигает -51 дБ.

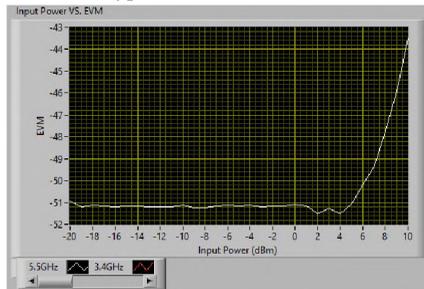


Рис. 7. Результаты измерений EVM методом кросс-корреляции

Пороговые значения EVM, измеренные методом одного анализатора, достигают -48 дБ (рис. 8). Из измерений, проведенных обоими методами, видно, что результаты пороговых значений EVM, полученные методом кросс-корреляции, были улучшены на 3 дБ.

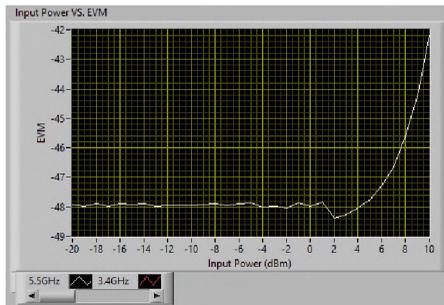


Рис. 8. Результаты измерений EVM методом одного анализатора

Для проведения измерений, характерных для UWB технологии, в программной

среде LabVIEW были смоделированы алгоритмы, позволяющие выполнять измерения спектральной плотности мощности (рис. 9) и точности модуляции (рис. 10) на сгенерированных UWB пакетах.

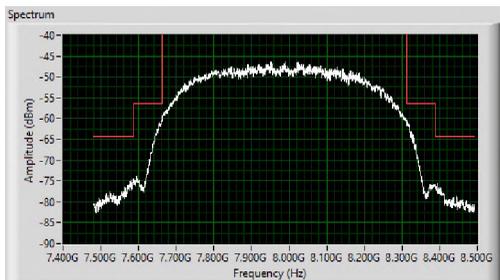
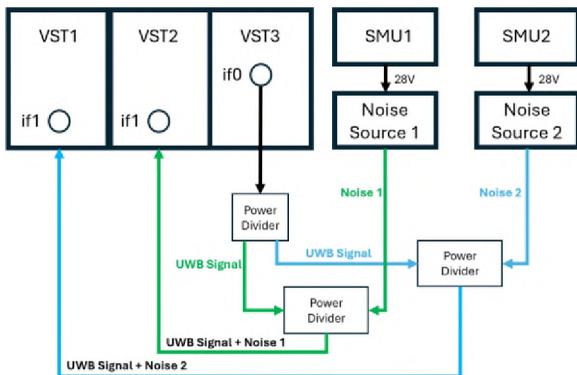


Рис. 9. Измерение спектральной плотности на пакете UWB



Рис. 10. Измерение точности модуляции на пакете UWB

В диссертации предложен метод повышения точности спектральных измерений, который позволяет устранить влияние шума из результатов измерений. Это достигается путем использования двух синхронизированных анализаторов и алгоритмов кросс-корреляции. Для реализации спектральных измерений и их улучшения использовалась система, представленная на рис. 11.



a)



б)

Рис. 11. Экспериментальная система: а - блок-схема, б - реальный вид

При использовании метода с одним анализатором значения спектральных измерений составили: ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) верхнего канала = -12,48 дБ, ACPR нижнего канала = -12,76 дБ. При использовании метода с двумя анализаторами значения составили: ACPR верхнего канала = -15,19 дБ, ACPR нижнего канала = -15,53 дБ. Таким образом, метод с двумя анализаторами улучшает показатели ACPR более чем на 2,7 дБ по сравнению с методом с одним анализатором.

**В третьей главе** представлены экспериментальные результаты измерений, выполненных с помощью разработанной системы тестирования. Разработан метод генерации сигналов для стандарта IEEE 802.15.4z UWB, обеспечивающий временные интервалы между пакетами с эффективным использованием памяти, разработан метод калибровки измерений времени распространения сигнала, проведены измерения времени распространения сигнала с использованием интегральных схем DW1000, а также выполнены измерения расстояния в условиях наличия сигнала WiFi с целью проверки устойчивости технологии UWB к интерференции.

При измерении чувствительности UWB приемника система тестирования должна обеспечивать возможность генерации необходимого количества пакетов. Для надёжной оценки чувствительности оборудование должно иметь возможность генерировать 2000 различных UWB-пакетов. Генерация такого большого количества пакетов значительно увеличивает время тестирования одного тестируемого устройства (DUT - Device Under Test). Более того, при тестировании нескольких DUT на этапах валидации или производства общее время испытаний увеличивается. В настоящее время используемые методы генерации пакетов - метод с добавлением нулей между сигналами (рис. 12), а также метод итеративной конфигурации (рис. 13) и генерации сигналов, имеют ряд недостатков. К ним относятся: длительный процесс создания пакетов, сложность точного задания времени интервала между пакетами, а также большое потребление памяти. Оценку времени, необходимого для многократной генерации тех же 2000 пакетов, что особенно важно при тестировании большого количества DUT, можно выполнить с использованием математического выражения (5).

$$T = \sum_N 2000 \cdot [t_{cfg}(\sigma_{cfg}=0.01) + t_{gen}(\sigma_{gen} \approx 0)], \quad (5)$$

где N представляет количество тестируемых устройств (DUT);  $t_{cfg}$  - время конфигурации сигнала;  $t_{gen}$  - время генерации пакета, а T - общее время генерации пакетов для N устройств. Стандартное отклонение общего времени генерации ( $\sigma_T$ ) зависит от стандартного отклонения времени конфигурации  $\sigma_{cfg}$ , так как время генерации пакета

детерминировано ( $\sigma_{gen} \approx 0$ ). Измеренное значение  $t_{cfg}$  составляет 0,48 с,  $\sigma_{cfg} - 0,01$ ,  $t_{gen} - 1,15$  мс, так как используются пакет длиной 0,15 мс и временной интервал между пакетами 1 мс. В случае необходимости тестирования 100 DUT, общее время, требуемое для генерации сигналов, составит

$$T = \sum_{100} 2000 \cdot (480 \text{ мс} + 1.15 \text{ мс}) = 96230 \text{ с.} \quad (6)$$



Рис. 12. Метод генерации с добавлением нулей между пакетами



Рис. 13. Метод итеративной конфигурации и генерации

Для решения этих задач предлагается метод генерации сигналов с эффективным использованием памяти, обеспечивающий временной интервал между пакетами. В программной среде LabVIEW был разработан детерминированный алгоритм-счётчик, позволяющий задавать необходимый временной интервал между пакетами без использования внутренней памяти генератора. Основой данного подхода является интеграция функции задержки в процесс генерации, которая отслеживает количество выборок, передаваемых устройством. Управляя количеством выборок, вызывающих задержку, и частотой дискретизации, возможно задавать длительность интервала между пакетами. Поскольку максимальная частота дискретизации модуля PXIe-5831 составляет 1,25 ГГц, одна выборка позволяет ввести задержку в 0,8 нс, что обеспечивает высокую точность при задании длительности интервала. На рис. 14 представлены первый и второй сгенерированные пакеты с использованием данного метода, где видно, что второй пакет принимается через 1 мс после первого, в соответствии с заданным временным интервалом между ними. В отличие от других методов, в данном подходе между сгенерированными пакетами отсутствует дополнительный этап конфигурации.

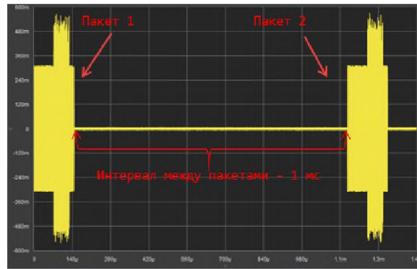


Рис. 14. Временной интервал между двумя последовательными пакетами, сгенерированными методом эффективного использования памяти

Поскольку при использовании данного метода все пакеты можно сохранить во внутренней памяти генератора сигналов (SG), процесс конфигурации пакетов осуществляется только один раз, после чего эти пакеты могут генерироваться при необходимости. Отсюда следует, что для тестирования большого количества DUT конфигурацию 2000 пакетов требуется выполнять всего лишь один раз:

$$T' = 2000 \cdot [t_{cfg}(\sigma_{cfg}=0.01) + \sum_N t_{gen}(\sigma_{gen} \approx 0)]. \quad (7)$$

При необходимости тестирования 100 DUT, общее время, необходимое для генерации сигналов, будет

$$T' = 2000 \cdot [480 \text{ мс} + \sum_{100} 1,15 \text{ мс}] = 1190 \text{ с} \approx 0,33 \text{ ч}. \quad (8)$$

Поскольку  $\sigma_T = \sigma_{cfg}$ ,  $T'$  будет колебаться в пределах  $\pm 0,003$  ч.

Из уравнений (6) и (8) следует, что  $T' \ll T$ . Это показывает, что предложенный метод значительно сокращает время тестирования при генерации большого количества пакетов. Более того, разница между значениями  $T$  и  $T'$  существенно увеличивается при росте количества тестируемых DUT, как показано на рис. 15.

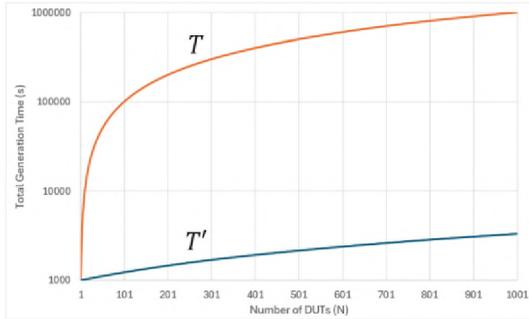


Рис. 15. Соотношение значений  $T$  и  $T'$

Измеряя время распространения сигнала, необходимо исключить из измеренных значений погрешности, вносимые самой тестовой системой, поскольку тестовая система может добавлять дополнительную длину, связанную с наличием кабелей и других радиочастотных компонентов в цепи. Калибровку тестовой системы и кабелей можно выполнить с помощью векторного анализатора цепей (VNA - Vector Network Analyzer), используя его в режиме TDR (Time Domain Reflectometer).

В работе предлагается методология калибровки, которая не требует использования дополнительного оборудования. Паразитное расстояние, добавляемое дополнительными кабелями и другими компонентами тестовой системы, можно компенсировать, измерив время распространения сигнала, сгенерированного на выходе iF0 модуля PXIe-5831, до его приема на входе iF1 того же устройства. Для проведения данного измерения необходимо обеспечить одновременный запуск генератора и анализатора. В этом случае можно определить разницу между временем генерации и временем приема сигнала путём вычитания момента старта анализатора из момента приёма сигнала. Поскольку генератор и анализатор запускаются синхронно, эта разница времени будет отражать время распространения радиосигнала по данному тракту. Основная сложность данного метода заключается в необходимости обеспечения наносекундного уровня синхронизации между запуском генератора и анализатора. Для достижения такой степени синхронности

в момент старта генерации генераторная часть PXIe-5831 отправляет цифровой триггерный сигнал аналитической части PXIe-5831, который инициирует процесс приёма сигнала (рис. 16).

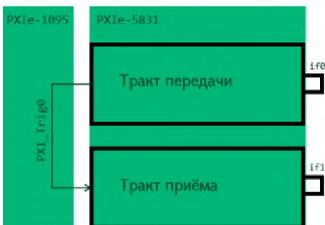


Рис. 16. Передача цифрового триггерного сигнала от передатчика к приёмнику

В момент, когда анализатор сконфигурирован и готов принять цифровой триггерный сигнал, генератор одновременно отправляет триггерный сигнал по линии PXI\_Trig0 и генерирует импульсный сигнал длительностью 0,1 мкс по выходу iF0. На рис. 17 представлена зависимость напряжения принятого анализатором сигнала от времени, где момент времени 0 соответствует моменту приёма цифрового триггерного сигнала, а момент времени 803,664 нс соответствует приёму импульсного сигнала, сгенерированного по выходу iF0. Это время включает в себя задержку триггерного сигнала, погрешности измерительной системы, а также время распространения импульсного сигнала по всему тракту прохождения, которое в данном случае соответствует длине двух кабелей (рис. 18).

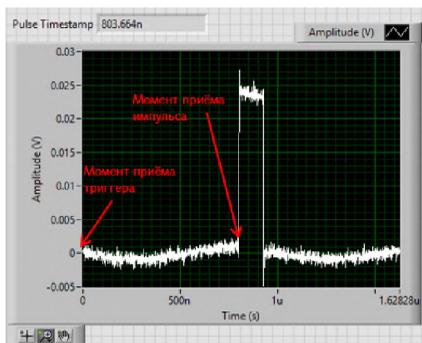
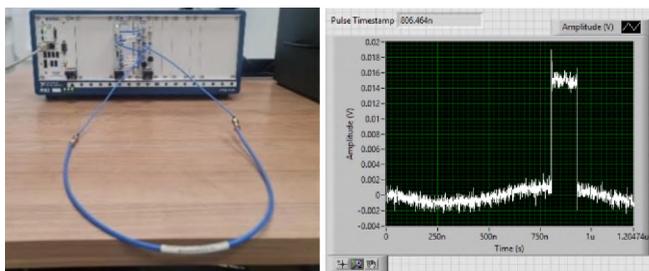


Рис. 17. Импульсный сигнал, принятый с задержкой



Рис. 18. Измерительная система и внешний вид двух кабелей

Отсюда следует, что если с помощью данной системы провести измерение расстояния и из полученного значения вычесть рассчитанные погрешности системы и время распространения импульсного сигнала по двум кабелям, в результате получится то время, которое импульс потратил на прохождение добавленного пути. Для увеличения пути прохождения сигнала к системе был подключён кабель SPSH-TPRFEP141-240-SPSH длиной 60,96 см (рис. 19а), после чего было выполнено аналогичное измерение (рис. 19б).



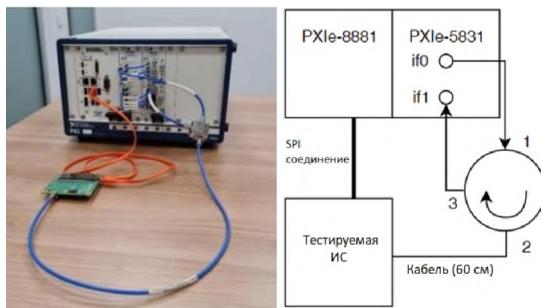
а)

б)

Рис. 19. Измерительная система с добавленным кабелем длиной 60,96 см (а) и принятый импульсный сигнал с добавленным кабелем (б)

Импульс был принят в момент времени 806,464 нс. Вычитая из этого значения результат измерения без добавленного кабеля длиной 60,96 см, который составил 803,664 нс, получаем разницу во времени 2,8 нс. Для расчета расстояния, соответствующего этой временной задержке, необходимо учитывать фазовый коэффициент скорости распространения сигнала по кабелю (Velocity Factor - VF). Для кабеля SPSH-TPRFEP141-240-SPSH VF составляет 71% (или 0,71), откуда расстояние составит 59,64 см. Это значение соответствует длине кабеля SPSH-TPRFEP141-240-SPSH с точностью до 1,5 см.

В данной работе предлагается система, позволяющая осуществлять измерения времени распространения сигнала. С использованием предложенной испытательной системы было проведено тестирование интегральной схемы, работающей по сверхширокополосной технологии компании DecaWave, с целью оценки точности определения расстояния методом DS-TWR. На рис. 20а представлен внешний вид системы тестирования, а на рис. 20б изображена её блок-схема.



а)

б)

Рис. 20. Внешний вид (а) и блок-схема (б) системы тестирования

Испытательная система откалибрована до второго порта циркулятора, поэтому ожидаемое значение при измерениях составляет 60 см, что соответствует длине кабеля, показанного на рис. 20б. Измерения расстояния были выполнены 20 раз, из которых видно, что значения расстояния не превышают диапазон  $60 \pm 3$  см.

Поскольку технология UWB может использоваться на тех же частотах, что и технология WiFi, необходимо проводить интерференционные измерения с этим стандартом. Частотный диапазон 6 ГГц стандарта WiFi 7 включает частоты от 5,925 до 7,125 ГГц. В данной работе исследовано влияние сигнала WiFi 7 на измерения расстояния, выполняемые с помощью интегральных схем UWB. Для этого предложена система тестирования, представленная на рис. 21, где интегральные схемы DW3000 находятся внутри экранированной камеры dbSAFE X и выполняют измерения расстояния. Одновременно по передающему тракту PXIe-5831 генерируется сигнал WiFi 7, который вводится внутрь экранированной камеры.



Рис. 21. Система тестирования для проведения интерференционных измерений

Сгенерированная мощность сигнала WiFi 7 изменяется от -60 дБм до 10 дБм, при этом генерация сигнала осуществляется на несущей частоте 6,5 ГГц. Тестирование проводилось при воздействии сигналов WiFi 7 с полосой частот 20 и 320 МГц. Точность измеренных значений расстояния приведена в таблице 2.

Таблица 2. Влияние сигнала WiFi 7 на точность измерения расстояния

Мощность сигнала WiFi 7 (дБм)	Измеренные значения расстояния (м) под воздействием сигнала WiFi 7 с полосой 20 МГц	Измеренные значения расстояния (м) под воздействием сигнала WiFi 7 с полосой 320 МГц
Сигнал отсутствует	0,26	0,26
-60	0,26	0,26
-40	0,26	0,26
-10	0,26	0,26-0,27
0	0,24-0,26	0,26-0,3
5	0,22-0,27	0,19-0,31
10	0,22-0,29	0,14-0,31

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В рамках диссертационной работы проведённые исследования и результаты измерений доказывают, что с помощью предлагаемой системы тестирования, разработанных алгоритмов и методологий возможно осуществление тестирования интегральных схем, работающих по сверхширокополосной технологии IEEE 802.15.4z, а также повышение точности и эффективности измерений.

1. Проведена работа по исследованию методов оптимизации времени тестирования интегральных схем IEEE 802.15.4z UWB, делая акцент на те измерения, которые требуют генерации большого количества пакетов. Анализированы традиционные методы генерации UWB пакетов, которые имеют ряд недостатков, в том числе трудоемкий процесс конфигурации сигналов, сложность точного задания интервала между пакетами, а также высокий объем требуемой памяти. Для преодоления этих проблем предложен новый метод генерации сигналов с эффективным использованием памяти, обеспечивающий временной интервал между пакетами. В программной среде LabVIEW разработан детерминированный счетный алгоритм, который позволяет задавать временной интервал между пакетами с точностью до 0,8 нс. Используя векторный приёмопередатчик PXIe-5831 компании National Instruments и среду LabVIEW, разработан алгоритм, обеспечивающий значительные улучшения с точки зрения как времени генерации сигналов, так и использования памяти. Расчеты показали, что во внутренней памяти генератора можно сохранить до 2666 UWB пакетов, тогда как при традиционном подходе удавалось сохранить только 347 пакетов. Кроме того, время генерации пакетов, необходимое для тестирования 100 интегральных схем, было значительно сокращено до 0,33 часа по сравнению с ранее необходимыми 26,73 часами. Экспериментальные результаты подтвердили, что предложенный метод позволяет один раз сконфигурировать 2000 UWB пакетов и использовать их при тестировании множества интегральных схем, что существенно снижает общее время, необходимое для тестирования.
2. Разработан метод калибровки системы тестирования с целью повышения точности измерения времени распространения сигнала. Данный метод позволяет исключить из результатов измерений погрешности, вносимые системой тестирования, без использования векторного анализатора цепей. Точность калибровки составила  $\pm 3$  см. Предложена система тестирования, которая позволила провести испытания интегральной схемы DW1000 компании DecaWave. Выполнено исследование метода определения расстояния DS-TWR, применяемого в сверхширокополосной технологии, с помощью которого выполнены измерения времени распространения сигнала (ToF). Алгоритм измерения расстояния был разработан в программной среде LabVIEW. Результаты показывают, что при измерении на расстоянии 60 см точность значений составляет 5 процентов.
3. Представлен метод повышения точности спектральных измерений сигналов IEEE 802.15.4z UWB, основанный на использовании двух синхронизированных анализаторов и технологии взаимной корреляции. В экспериментальной системе использовались три векторных приёмопередатчика. Один из них применялся в

качестве генератора сигнала, а два других - в качестве анализаторов. Для имитации шумовой среды использовались источники шума. Проведены сравнительные спектральные измерения с использованием одного анализатора и двух анализаторов. Результаты показали, что метод с двумя анализаторами обеспечивает улучшение показателя ACPR более чем на 2,7 дБ.

4. Проведено сравнение методов измерения EVM с использованием одного анализатора и метода кросс-корреляции, в результате которого были определены собственные пороговые значения EVM измерительной системы. Измерения проводились в соответствии со стандартом WiFi 7 с использованием сигнала с шириной полосы 320 МГц и модуляцией MCS13. В качестве генератора сигнала и анализатора использовался модуль PXIe-5831, а моделирование алгоритма измерений выполнялось в программной среде LabVIEW. При использовании метода измерения EVM с одним анализатором собственные пороговые значения EVM измерительной системы на частоте 5,5 ГГц и мощностях сигнала на входе анализатора от -20 до 5 дБм достигали уровня -48 дБ. В случае применения метода кросс-корреляции пороговые значения EVM достигали уровня -51 дБ. Таким образом, видно, что при измерениях методом кросс-корреляции можно получить улучшение пороговых значений измерительной системы до 3 дБ, что позволяет проводить измерения на малопомутных устройствах, применяемых в современных системах связи.
5. Исследована устойчивость измерений расстояния интегральных схем DW3000 к интерференционным помехам. Тестирование проводилось под воздействием сигналов WiFi 7 с полосой частот 20 и 320 МГц. Результаты измерений показывают, что при мощности сигнала WiFi 0 дБм точность измерения расстояния составляет 7,7%. При мощности сигнала 10 дБм точность измерения расстояния под воздействием сигнала с полосой частот 20 МГц составляет 15,4%, а при полосе частот 320 МГц составляет 34,6%.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. **Tsaturyan G.**, Gomtsyan H. Testing Time Optimization Method for IEEE 802.15.4z Ultra-wideband Integrated Circuits// Journal of Telecommunications and Information Technology. - 2024. - vol. 97. - №3. - P. 1-6.
2. **Tsaturyan G.** Spectral Measurements Improvement Technique for IEEE 802.15.4z Ultra-Wideband Devices// Armenian Journal of Physics. - 2024. - Vol. 17. - №4. - P. 71-77.
3. **Цатурян Г.А.** Измерение величины вектора ошибок стандарта WiFi7 методом кросс-корреляции// Вестник Российско-Армянского университета. - 2024. - №1. - С. 73-80.
4. **Ծառուրյան Գ.,** Անտոնյան Ս., Մովսիսյան Լ. Գերլայնաչերտ տեխնոլոգիայով աշխատող ինտեգրալ սխեմայի թեստավորում// Վանաձորի պետական համալսարանի գիտական տեղեկագիր, Բնական ճշգրիտ գիտություններ. – 2022. - №1. - էջ 28-36.
5. Ստեփանյան Ա.Հ., Անտոնյան Ս.Վ., **Ծառուրյան Գ.Ա.,** Խաչատրյան Լ.Իս. Գերլայնաչերտ տեխնոլոգիայում կիրառվող անտենայի բնութագրերի հետազոտումը// ՀԱՊՀ Լրաբեր, Գիտական հոդվածների ժողովածու. – 2022. - մաս 1. - էջ 241-251.
6. 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.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Գերլայնաշերտ տեխնոլոգիաները, որոնք ունեն 500 ՄՀց ազդանշանի հաճախային շերտ՝ լայն տարածում են ստանում արդի ռադիոտեխնիկական համակարգերում: Այս համակարգերի հիմնական առավելություններից են սանտիմետրերի ճշտությամբ հեռավորության որոշումը, ինտերֆերենցիայի հանդեպ կայունությունը, փոքր հապաղումը և օգտագործվող ազդանշանների ցածր հզորությունը: IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ (Ultra-wideband - UWB) տեխնոլոգիան կարճ հեռավորությունների համար նախատեսված անլար կապի ստանդարտ է, որում օգտագործում են 3.1 ԳՀց-ից մինչև 10.6 ԳՀց հաճախությունները: UWB են կոչվում այն համակարգերը, որոնց հաճախային շերտը կազմում է կենտրոնական հաճախականության 20 տոկոսը կամ գերազանցում է 500 ՄՀց-ը:

IEEE 802.15.4z UWB տեխնոլոգիան զգալի առավելություններ ունի իր մրցակիցների, օրինակ՝ ռադարային համակարգերի և ճշգրիտ տեղորոշման այլ տեխնոլոգիաների համեմատ: UWB տեխնոլոգիան հանդիսանում է օպտիմալ լուծում իրական ժամանակում տեղորոշման և դետեկտման խնդիրների համար, որը կիրառելի է ինչպես սպառողական էլեկտրոնիկայում այնպես էլ գործարաններում և արտադրական գործընթացներում սարքավորումների վերահսկման համար: UWB ինտեգրալ սխեմաները հեշտությամբ տեղավորվում են այնպիսի փոքր սարքերում, ինչպիսիք են սմարթֆոնները կամ ժամացույցները: Երբ երկու IEEE 802.15.4z UWB սարքեր գտնվում են կապ հաստատելու համար բավականաչափ մոտ հեռավորության վրա, դրանք սկսում են չափել միմյանց նկատմամբ ունեցած դիրքը և հեռավորությունը՝ կիրառելով ազդանշանի տարածման ժամանակի չափման սկզբունքը: Մի սարքից մյուսը իմպուլս ուղարկելու և իմպուլսի տարածման ժամանակը չափելու միջոցով երկու սարքերը կարողանում են ճշգրիտ որոշել միմյանց նկատմամբ ունեցած դիրքը և հեռավորությունը: Սա հատկապես առավելություն է փակ տարածություններում, որտեղ GPS համակարգի աշխատանքը հաճախ սահմանափակվում է: Իր կարճ փոխանցման տևողության և տվյալների փոքր փաթեթների շնորհիվ UWB տեխնոլոգիան լայնորեն կիրառվում է նաև այն համակարգերում, որտեղ անհրաժեշտ է փոքր հապաղում և արագ արձագանքման ժամանակ: UWB-ի ցածր սպեկտրալ հզորության խտությունը օգնում է նվազագույնի հասցնել ազդանշանային խանգարումները, ինչպես նաև բարդացնում է ազդանշանների հայտնաբերումը, ինչը տվյալների փոխանցմանը հաղորդում է լրացուցիչ անվտանգություն: Այս առավելությունները նպաստում են IEEE 802.15.4z UWB ինտեգրալ սխեմաների լայն կիրառմանը ավտոմոբիլային ոլորտում, սմարթֆոններում, խելացի տան տեխնոլոգիաներում, ինչպես նաև փակ տարածքներում տեղորոշման բարձր ճշգրտություն պահանջող կիրառություններում:

IEEE 802.15.4z UWB տեխնոլոգիայի տարածումը ստեղծում է դրանցում

օգտագործվող ինտեգրալ սխեմաների թեստավորման լայն պահանջարկ: UWB ֆունկցիոնալության ներդրման նպատակով ինդուստրիայում ներկայացված ինտեգրալ սխեմաները իրենց հետ բերում են մի շարք թեստավորման մարտահրավերներ: Դրանք կապված են այն հանգամանքի հետ, որ UWB տեխնոլոգիան աշխատում է բարձր՝ մինչև 10.6 ԳՀց հաճախություններում, ունի մեծ հաճախային շերտ, ինչպես նաև օգտագործում է բարդ մոդուլացիոն սխեմաներ: Արդյունավետ թեստավորման հարթակը պետք է ունենա բավարար ճկունություն և ընդլայնելիություն, որպեսզի կարողանա ապահովել այդ հաճախականությունների և հաճախային շերտերի վերլուծությունը: Բացի այդ, անհրաժեշտ է բավարար հաշվողական հզորություն, որպեսզի հնարավոր լինի արդյունավետ կերպով վերլուծել ստացված թեստավորման արդյունքները: Այսպիսի պահանջները անհրաժեշտություն են ստեղծում ներկայումս ինդուստրիայում առկա թեստավորման համակարգերի կատարելագործման և բարելավման՝ ապահովելու համար UWB ինտեգրալ սխեմաների ճշգրիտ, արդյունավետ վավերացումը և ինտեգրումը տարբեր կիրառություններում:

Հետազոտական աշխատանքի նպատակն է գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայում օգտագործվող ինտեգրալ սխեմաների թեստավորման համակարգերի և չափումների հետազոտումը, մշակումը և բարելավումը:

Վերոնշյալ նպատակին հասնելու համար իրականացվել են հետևյալ հետազոտությունները՝

- Ուսումնասիրվել է IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայի աշխատանքային սկզբունքը:
- Ուսումնասիրվել են IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայում օգտագործվող փաթեթների կառուցվածքը և ռադիոհաճախային պարամետրերը:
- Ուսումնասիրվել են ինդուստրիայում առկա IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայի ինտեգրալ սխեմաների թեստավորման համար օգտագործվող չափման համակարգերը:
- Ուսումնասիրվել են IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայում օգտագործվող ինտեգրալ սխեմաների թեստավորման մարտահրավերները և թեստավորման համակարգերին դրվող պահանջները:
- Թեստավորման համակարգի կիրառելիության ընդլայնման և ծախսատար պրոցեսների կրճատման նպատակով՝ LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակվել է ալգորիթմ WiFi ստանդարտի վեկտորական սխալանքի մեծություն (Error Vector Magnitude – EVM) չափումների բարելավման համար:
- Իրականացվել է IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիային հատուկ չափումների մեթոդոլոգիաների հետազոտում և ալգորիթմների մշակում:
- Մշակվել է IEEE 802.15.4z գերլայնաշերտ տեխնոլոգիայում օգտագործվող փաթեթների գեներացիայի համար հիշողության արդյունավետ

օգտագործման մեթոդ, որը նպաստում է թեստավորման ժամանակի բարելավմանը:

- Մշակվել է թեստավորման համակարգ, որը հնարավորություն է տալիս իրականացնել UWB տեխնոլոգիային հատուկ՝ ազդանշանի տարածման ժամանակի (Time of Flight - ToF) չափումներ:
- Մշակվել է թեստավորման համակարգի չափաբերման մեթոդ՝ ազդանշանի տարածման ժամանակի չափումների ճշգրտությունը բարելավելու նպատակով:
- Մշակված թեստավորման համակարգով իրականացվել են չափումներ DW1000, DW3000 և SR150 մակնիշի ինտեգրալ սխեմաների վրա:
- Մշակված թեստավորման համակարգով իրականացվել են UWB և WiFi7 ազդանշանների ինտերֆերենցիոն չափումներ:

**GRIGOR ARMEN TSATURYAN**

## **DESIGN OF A TESTING SYSTEM AND OPTIMIZATION OF MEASUREMENT TECHNIQUES FOR INTEGRATED CIRCUITS USED IN ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY**

### **SUMMARY**

Ultra-wideband (UWB) technologies, which have a signal bandwidth of 500 MHz, are widely used in modern radio engineering systems. The main advantages of these systems are centimeter-level distance measurement accuracy, resistance to interference, low latency, and low power of the transmitted signals. The IEEE 802.15.4z UWB technology is a short-range wireless communication standard that operates in the frequency range from 3.1 GHz to 10.6 GHz. Systems are classified as UWB if their bandwidth is 20 percent of the central frequency or exceeds 500 MHz.

The IEEE 802.15.4z UWB technology has significant advantages over its competitors, such as radar systems and other precise positioning technologies. UWB technology is an optimal solution for real-time localization and detection tasks, applicable both in consumer electronics and in industrial environments for equipment monitoring and control. UWB integrated circuits are easily embedded in compact devices such as smartphones or smartwatches. When two IEEE 802.15.4z UWB devices are within a sufficiently close range to establish a connection, they begin to measure their position and distance relative to each other using the principle of time of flight (ToF) measurement. By transmitting a pulse from one device to another and measuring the propagation time of the pulse, the devices can accurately determine their relative position and distance. This is especially advantageous in indoor environments where GPS performance is often limited. Due to its short transmission duration and small data packets, UWB technology is also widely used in systems where low latency and fast response time are required. The low power spectral density of UWB helps minimize signal interference and complicates signal detection, providing additional security for data transmission. These advantages contribute to the wide adoption of IEEE 802.15.4z UWB integrated circuits in the automotive industry,

smartphones, smart home technologies, as well as in applications requiring high-precision localization in indoor environments.

The expansion of IEEE 802.15.4z UWB technology creates a high demand for testing the integrated circuits used in these systems. The UWB integrated circuits presented in the industry bring a number of test challenges. These challenges are mainly related to the fact that UWB technology operates at high frequencies up to 10.6 GHz, has a wide frequency bandwidth, and uses complex modulation schemes. An effective testing platform must have sufficient flexibility and scalability to support the analysis of such frequencies and bandwidths. In addition, adequate computational power is required to efficiently analyze the obtained test results. These requirements create the necessity to improve and enhance the existing test systems in the industry to ensure accurate and efficient validation and integration of UWB integrated circuits into various applications.

The aim of the research work is the study, development, and improvement of testing systems and measurement methods for integrated circuits used in UWB technology. To achieve the intended goal, the following tasks are solved in the work:

- Operating principle of IEEE 802.15.4z ultra-wideband (UWB) technology was studied.
- The structure of the packets used in IEEE 802.15.4z ultra-wideband (UWB) technology and their radio frequency parameters were investigated.
- The measurement systems used in the industry for testing integrated circuits of IEEE 802.15.4z UWB technology were studied.
- The challenges of testing integrated circuits in IEEE 802.15.4z UWB technology and the requirements for test systems were analyzed.
- To expand the applicability of the test system and reduce cost-intensive processes, an algorithm was developed in the LabVIEW software environment to improve Error Vector Magnitude (EVM) measurements for the WiFi standard.
- Methodologies and algorithm development were carried out for measurements specific to the IEEE 802.15.4z ultra-wideband (UWB) technology.
- A memory-efficient waveform generation method was developed for generating packets used in the IEEE 802.15.4z UWB technology, which contributes to the test time optimization.
- A test system was developed that enables the implementation of Time of Flight (ToF) measurements specific to UWB technology.
- A calibration method for the testing system was developed to improve the accuracy of Time of Flight measurements.
- Using the developed test system, measurements were performed on integrated circuits of the DW1000, DW3000, and SR150 series.
- Interference measurements of UWB and WiFi7 signals were performed using the developed testing system.

