

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

УДК 621.396.2:621.398

На правах рукописи

АГЕЕВ
Алексей Викторович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА
ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ИОНИН Виктор Сергеевич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **БОНДАРИК Василий Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета доуниверситетской подготовки учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 г. года в 13⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные системы телеметрии постепенно получают все большее распространение на промышленных и коммунальных объектах. Использование беспроводного канала передачи данных имеет целый ряд преимуществ перед традиционными проводными линиями. Главным из них стало отсутствие необходимости прокладки кабеля между диспетчерским пунктом и объектом телеметрии.

Прокладка кабельной трассы весьма затратна, особенно если трасса пересекает действующие коммуникации или природные преграды. Огромное количество необходимых согласований еще больше усложняют и удорожают задачу. Сам кабель также представляет собой узкое место системы. Он подвержен механическим повреждениям, а также может быть банально украден. Использование готовых телефонных или им подобных линий связи не всегда выгодно ввиду низкого качества связи и высокой абонентской платы, взимаемой операторами связи.

Решением проблемы обеспечения линии связи становится использование средств беспроводной передачи данных. На сегодняшний день наибольшее распространение получили два типа подобных систем, отличающихся некоторыми принципами работы. Первый из них использует передачу данных на частоте 433 МГц, второй основан на использовании станций сотовой связи стандарта *GSM*.

Главными преимуществами связи на частоте 433 МГц становится полное отсутствие затрат на передачу информации. При правильно подобранном оборудовании, не требуется лицензия на использование частоты. Пользователю достаточно только смонтировать средства связи и начать передавать данные.

Имеющиеся сегодня на рынке решения в области беспроводной телеметрии опираются на более чем десяток «стандартов», однако явных технологий-лидеров и компаний-лидеров среди них нет. Основными проблемами данных систем является энергоэффективность, спектральная эффективность и надежность доставки в случае дублирования сообщений.

Так же стоит отметить что, одной из важных составляющих управления беспроводной сетью является проектирование зон покрытия, которая предназначена для обеспечения заданного качества приема по всей области обслуживания, а не в какой-либо отдельной точке.

Широкое применения и внедрения беспроводных сетей выдвигает в ряде первоочередных задач разработку методов по оптимизации работы и оценки производительности беспроводных сетей. Проблемам разработки математических моделей сетей и передачи данных посвящено значительное количество работ. Среди наиболее известных работ, посвященных этим проблемам, следует отметить работы следующих ученых (Башарина, П.П. Бочарова, О.М. Брехова, В.А. Васенина, В.М. Вишневого, Р.Л. Добрушина, А.Н. Дудина).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Курс на «цифровизацию» экономики в развитых странах мира порождает в числе прочего спрос на системы телеметрии (дистанционного сбора информации) и управления – основу «интернет вещей». Имеющиеся сегодня на рынке решения опираются на более чем десяток «стандартов» беспроводной телеметрии, однако явных технологий-лидеров и компаний-лидеров среди них нет.

Существенной проблемой данных систем является энергоэффективность, спектральная эффективность и надежность доставки в случае дублирования сообщений.

В связи с вышесказанным, актуальной является исследования и разработка программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии отвечающей требованиям сбалансированности по дальности передачи, энергоэффективности, надежности доставки сигнала.

Степень разработанности проблемы

Исследованию математических моделей беспроводных сетей и каналов передачи данных посвящено значительное количество работ. Среди наиболее известных следует отметить работы ученых: Г.П. Башарина, П.П. Бочарова, О.М. Брехова, В.А. Васенина, В.М. Вишневого, Р.Л. Добрушина, А.Н. Дудина. Одним из недостатков исследований, является неполное рассмотрение особенностей телеметрии, а также передачи данных в узком диапазоне на частоте 433 МГц.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе создания программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка единой программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Провести анализ существующих технологий в области беспроводной связи и телеметрии, их моделей и методов организации связи.
2. Разработать модели и алгоритмы анализа для проектирования и реализации программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии для любого числа потенциальных клиентов в пределах заданной территории.
3. По результатам моделирования выполнить анализ влияния конфигурации полосковой антенны на качество реализации беспроводной телеметрии, что позволит повысить эффективность передачи данных.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту

высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-38 81 01 Компьютерные технологии проектирования электронных систем.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы ученых в области исследование математических моделей беспроводных сетей и каналов передачи данных, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке единой программно-аппаратной платформы, позволяющей передавать данные с автономных необслуживаемых датчиков на расстояние не менее 1 километра в условиях плотной городской застройки с нагрузкой до 1 миллиона сообщений на один приёмный узел в сутки.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе возможных коллизий в ходе передачи сообщений.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанной программно-аппаратной платформе для беспроводной телеметрии, которая позволит оптимизировать процесс пакетной передачи данных.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Механизм реализации программно-аппаратной платформы для беспроводной телеметрии.
2. Алгоритм анализа коллизий.
3. Влияние конфигурации полосковой антенны на обеспечение качества беспроводной телеметрии.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 54-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2018 г.), 13-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2017» (г. Севастополь, Российская Федерация, 2017 г.).

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в печатных работах: 4 статьи в сборниках материалов научных конференций.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 7 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен обзор современных технологий обеспечивающих беспроводную связь и телеметрию, а также рассмотрена возможность разработки новой более сбалансированной программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии. **Во второй** главе были рассмотрены методы для увеличения пропускной способности беспроводной сети: замена бита информации чиповой последовательностью, замена бита информации символом, анализ коллизии. **В третьей** главе представлена реализация программно-аппаратной платформы для телеметрии на примере датчика распознавания домашних животных с последующем моделирование печатной антенны датчика.

Общий объем диссертационной работы составляет 82 страницы. Из них 63 страниц основного текста, 42 иллюстраций на 34 страницах, 3 таблицы на 2 странице, библиографический список из 59 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 4 приложений на 19 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы передачи данных в беспроводной телеметрии, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, а также описано обоснование актуальности темы.

В общей характеристике работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе В первой главе приведен обзор современных систем, отвечающих за пакетную передачу данных.

Из анализа следует, что на сегодняшний день существуют два класса семейств для обеспечения беспроводной телеметрии такие как «LoRa», и «СТРИЖ». Было показано, что данные системы телеметрии имеют ряд недостатков:

1. Энергоэффективность. Малая длительность передачи отдельного пакета (малая скважность передачи) – это важно как для экономии заряда батарей, так и для повышения пропускной способности системы.

2. Спектральная эффективность. Экономичное использование спектра важно для повышения пропускной способности системы и обеспечения мирного сосуществования с другими системами беспроводной связи.

3. Надёжность доставки. Высокая вероятность получения приёма данного оригинального сообщения или (в случае так или иначе реализованного дублирования) его «теней», позволяющих оригинальное сообщение восстановить.

4. Своевременность. Низкая латентность приёма при использовании дублирования сообщений, т.е. такой алгоритм восстановления, который позволяет восстановить непринятый пакет как можно скорее.

Предложена (и реализована в решении для слежения за активностью животных) система беспроводной связи, в которой отсутствует модуляция с расширением спектра, используемой в «LoRa», а так же отсутствует экстремально зауженный канал передачи – «Стриж» и его аналогов.

Показаны преимущества предлагаемой архитектуры по сравнению с другими решениями:

- значительно более простой, дешёвый и энергоэффективный приёмник, не требующий активного охлаждения и потребляющий менее 3 Вт, что позволяет при необходимости запитывать его от солнечной батареи;

- возможность передавать большие инфопотоки и, при тех же батареях, более чем в 10 раз больший срок автономной работы абонентских устройств за счёт сокращения до 0,1 сек длительности каждой отдельной передачи;

- частотный диапазон 433 МГц, характеризующийся лучшей проникающей способностью радиоволн и дающий лучшую стабильность кварцевых генераторов при том же классе точности;

- «локальная» обратная связь с оконечными устройствами по NFC.

Отмечены ограничения предлагаемого решения:

- невозможность реализации схемы *listen-before-talk* с перестройкой частоты абонентского устройства для повышения помехозащищённости.

Введен агрегированный показатель достоинства беспроводной телеметрии *Figure of merit*, который подтверждает превосходство разрабатываемой технологии над существующими.

Во второй главе приведена возможность использования методов для увеличения пропускной способности беспроводной сети, представлена методика анализа коллизии.

Для проведения и исследования анализа коллизии необходимо было рассмотреть протокол работы и структуру сообщений датчиков, на базе которой реализована платформа по обеспечению беспроводной телеметрии. В датчике акселерометр работает с частотой выборки (*ODR*) 1,5625 Гц, *Low Power mode*, по показаниям a_x , a_y и a_z за некоторый базовый интервал (за 1

минуту) вычисляется среднее $a^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$ и среднеквадратичное отклонение от среднего (с восьмибитной точностью каждое из этих двух чисел), и за t базовых интервалов (минут) формируется пакет данных по данному интервалу, вместе с повтором данных по $r = 1$ (обозначение r от *redundancy*) предыдущим интервалам (таблица 1):

Таблица 1 – Структура сообщения

Блок	Размер, байт
Преамбула	5
Синхрослово	2
Номер логгера (1...256)	1
Номер посылки (1...256)	1
Данные	$2mr$
CRC-32	3
Итого	$12+2mr$

Результирующий инфопоток равен $12 + 2mr$ байтам за t базовых интервалов (минут):

$$Inforate = 8(12 + 2mr)/60t \text{ бит/с.}$$

На рисунке 1 показан результирующий информационный поток, отмечено, что для уменьшения инфопотока (за счёт уменьшения относительной доли передаваемой за сеанс служебной информации) увеличение t сверх 10 – 12 минут даёт малый эффект.

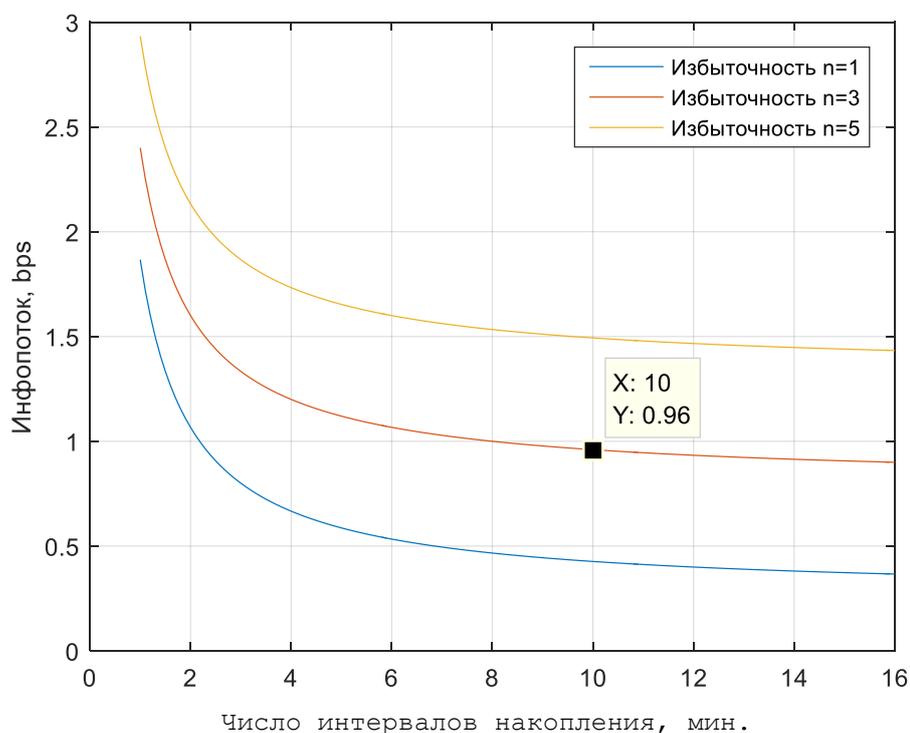


Рисунок 1 – Результирующий инфопоток

Например, для $m=10$, $n=3$ имеем инфопоток 0,96 бит/с. Если скорость передачи 9600 бит/с, то скважность (пренебрегая инициализацией трансивера) $\delta=0,96/9600=1e-4$. Меньше скорость – больше дальность, но больше и скважность, а значит, и вероятность коллизий, и токопотребление. В каждом конкретном случае скорость передачи должна выбираться наибольшей, при которой ещё обеспечивается надёжно нужная дальность связи.

Снижение скорости передачи $TXrate$ ради достижения большей дальности влечёт увеличение потерь сообщений в результате наложения их, приходящих от разных датчиков на одной частоте.

На основе анализа экспериментальных данных сделаны следующие заключения:

- для уменьшения вероятности наложения пакетов друг на друга необходимо снизить скорость трансивера $TXrate$ вплоть до 500 бит/с, что позволит обеспечить лучшую дальность;

- передавать за сеанс не только информацию по новому интервалу, но и присоединять к посылке повторно данные по двум предыдущим ($r = 3$). Такие настройки позволяют терять не более 0,5% данных в системе из 50-ти и 3% из ста датчиков, при этом время работы батарей должно превысить 5 лет.

Отмечено, что в дальнейшем можно рассмотреть более плотную упаковку передаваемой информации и перейти к *TDMA* схеме с синхронизацией, если проблема коллизий будет слишком серьёзной.

В третьей главе представлена реализация программно-аппаратной платформы для беспроводной телеметрии на примере датчика слежения за активностью животных (рисунок 2) с последующим моделированием печатной антенны датчика. Было рассмотрено и выбрано программное обеспечение для проведения моделирования *MatLab Antenna ToolBox*, позволившее реализовать моделирование печатной антенны.



Рисунок 2 – Датчика распознавания домашних животных

Для процесса моделирования необходимо было импортировать в *MatLab Antenna Tool Box* маску антенны. На рисунках 3 и 4 представлены два варианта конфигурации маски антенны.

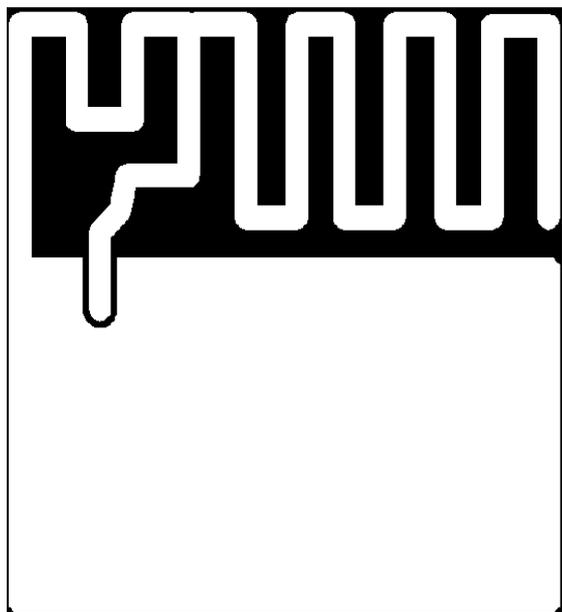


Рисунок 3 – Конфигурация маски антенны вариант 1

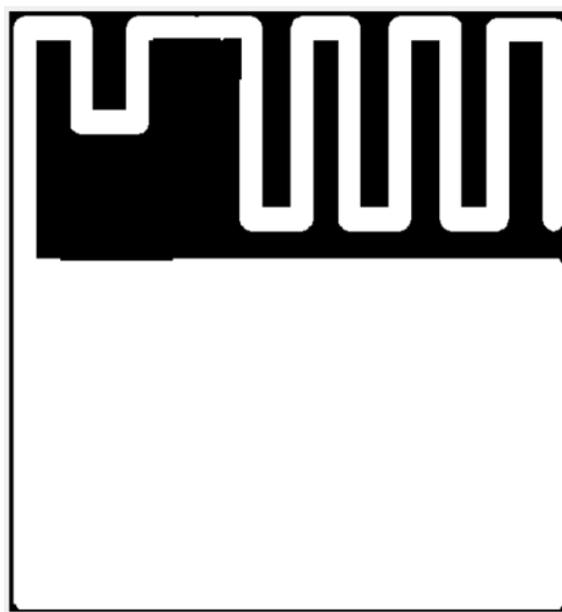


Рисунок 4 – Конфигурация маски антенны вариант 2

В результате моделирования на частоте 433 МГц были получены трехмерные модели диаграмм направленности для двух конфигураций антенн, представленные на рисунках 5 и 6.

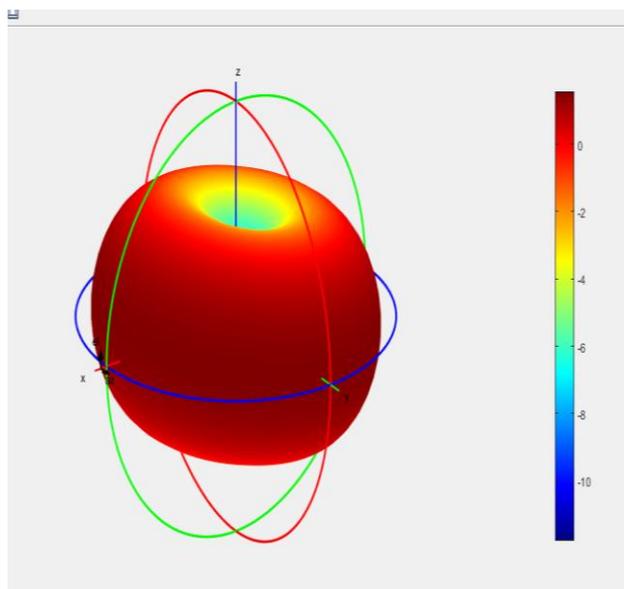
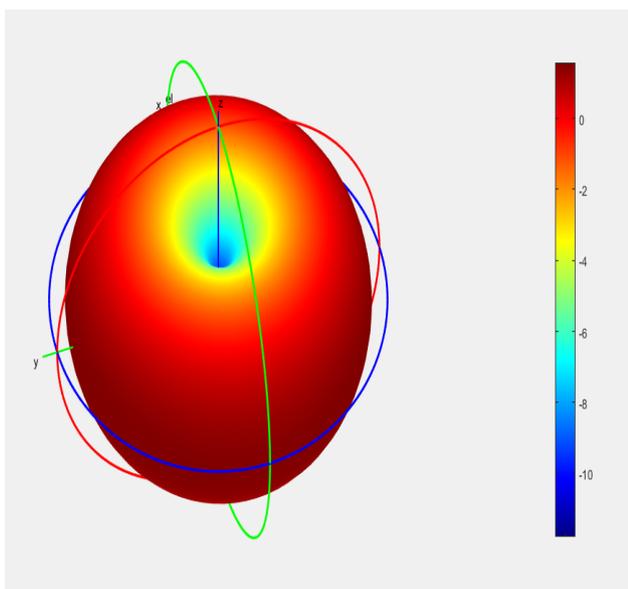


Рисунок 5 – Трехмерная модель диаграммы направленности для первого варианта конфигурации антенны



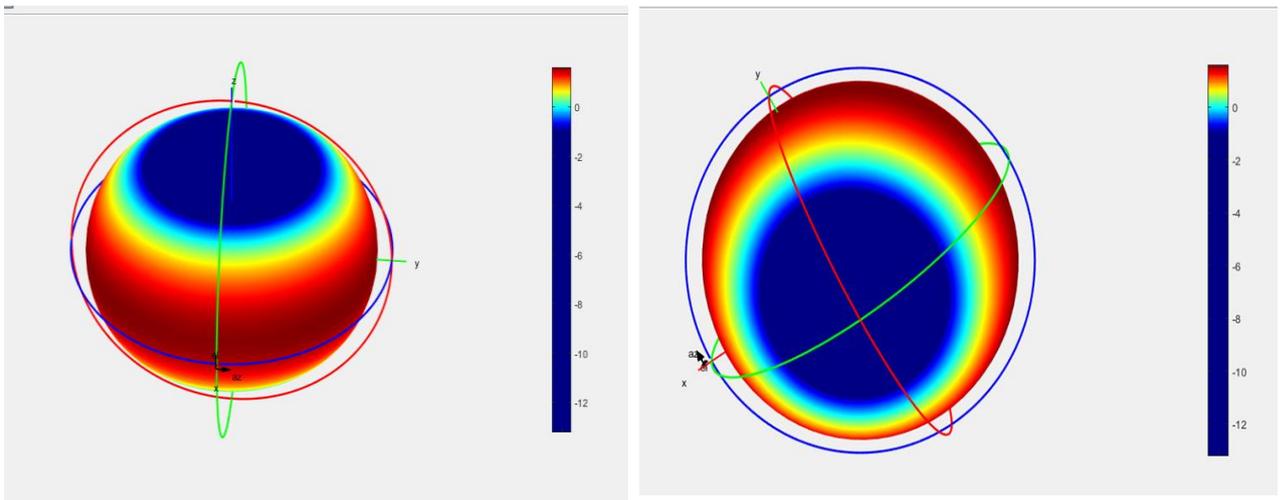


Рисунок 6 – Трехмерная модель диаграммы направленности для второго варианта конфигурации антенны

На основании полученных трехмерных моделей диаграмм направленности сделано заключение, что первый вариант конфигурации антенны является более эффективным и способен более качественно реализовать передачу данных, так как модель имеет ярко выраженную интенсивность излучения антенны в различных направлениях в пространстве.

Получены спектры сигналов, представленные на рисунках 7 и 8, от двух вариантов конфигурации антенн в условиях центра города, подтверждающие результаты моделирования: первый вариант конфигурации антенны является более эффективным и способен более качественно реализовать передачу данных. Так как спектр сигнала для первого варианта антенны не имеет провалов по уровню сигнала, то при его обработке значительно увеличится шанс избежать нежелательной потери информации, в отличие от второго варианта конфигурации антенны, где имеется тенденция просадки уровня сигнала, которая негативно отразится на качестве передаваемых данных.

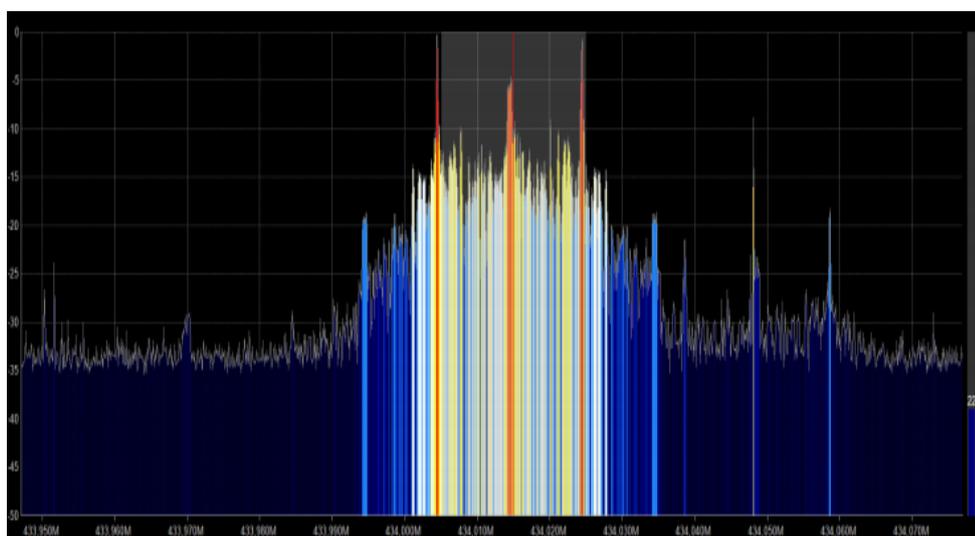


Рисунок 7 – Спектр сигнала для первого варианта конфигурации антенны

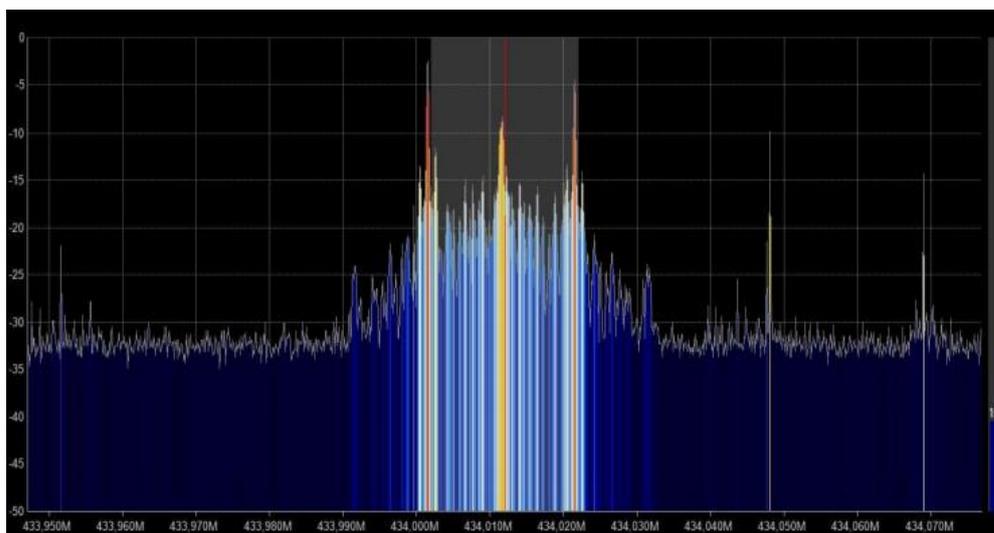


Рисунок 8 – Спектр сигнала для второго варианта конфигурации антенны

Регистрация спектра сигнала осуществлялась при помощи *DVB-T DAB FM* приёмника со штатной штыревой антенной и программой *SDR RTL-SDR (USB)*.

Результатом третьей главы стала реализация программно-аппаратной платформы для телеметрии на примере датчика слежения за активностью животных с последующим моделированием печатной антенны датчика. Разработанная методика моделирования печатной антенны в перспективе будет подвергаться модернизации и доработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен и реализован (на примере датчиков для слежения за активностью животных) принцип единой программно-аппаратной платформы для беспроводной телеметрии, отвечающей требованиям сбалансированности по дальности передачи, энергоэффективности, надежности доставки сигнала [1].

2. Разработаны алгоритмы для решения задач размещения датчиков и приёмопередающих устройств в среде передачи данных на открытой местности. Проведен анализ коллизий, возникающих в ходе передачи пакета сообщений, рассмотрены основные методы для увеличения пропускной способности беспроводной сети [2].

3. Создана методика для проектирования и моделирования печатных антенн с последующим анализом диаграммы направленности, позволяющая выбрать оптимальное решение для обеспечения телеметрии, исходя из условий применения данной системы [3–4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты магистерской работы были внедрены в учебный процесс

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Принцип обеспечения собственной системы беспроводной связи в телеметрии / А.В. Агеев, А.В. Стрельцова, С.А. Грудковский, В.Ф.Алексеев // материалы 13-ой международной молодежной научнотехнической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2017», Севастополь, Российская Федерация / УО «СГУ». – Севастополь, 2017. – С. 103.

2. Расчет погрешности информационно-измерительной системы / А.В. Стрельцова, А.В. Агеев, Г.А. Пискун // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – С.44–46.

3. Технологии аддитивного производства радиоэлектронных средств / И.А. Юхновец, А.В. Агеев, Г.А. Пискун // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – С.116–117.

4. Способы защиты современных защитных покрытий печатных плат устройств обработки данных. / И.А. Юхновец, А.В. Агеев, Г.А. Пискун // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – С.115.

РЭЗІЮМЭ

Агееў Аляксей Віктаравіч

Праграмна-апаратная платформа для бесправадной тэлеметрыі

Ключавыя словы: праграмна-апаратная платформа, бесправадная тэлеметрыя.

Мэта працы: распрацоўка адзінай праграмна-апаратнай платформы для забеспячэння бесправадной тэлеметрыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз існуючых метадаў і прынцыпаў пабудовы бесправадных сетак у галіне тэлеметрыі. Выяўлена, што ў цяперашні час у айчынных і замежных крыніцах недастаткова асветлена пытанне збалансаванасці, энергаэфектыўнасці, спектральнай эфектыўнасці і надзейнасці дастаўкі дадзеных у тэлеметрыі. Прапанаваны і рэалізаваны (на прыкладзе датчыкаў для сачэння за актыўнасцю жывёл) прынцып адзінай праграмна-апаратнай платформы для бесправадной тэлеметрыі, якая адказвае патрабаванням збалансаванасці па далёкасці перадачы, энергаэфектыўнасці, надзейнасці дастаўкі сігнала. Распрацавана методика для мадэлявання друкаваных антэн з наступным аналізам дыяграмы накіраванасці, якая дазваляе выбраць аптымальнае рашэнне для забеспячэння стабільнай перадачы дадзеных на адлегласці ў тэлеметрыі.

Ступень выкарыстання: вынікі магістарскай працы былі ўкаранены ў навучальны працэс УА «БДУІР».

Вобласць ужывання: сістэмы аддаленага доступу, сістэмы для збору і маніторынгу ў ЖКГ, сістэмы распазнання хатніх жывёл у сферы сельскай гаспадаркі.

РЕЗЮМЕ

Агеев Алексей Викторович

Программно-аппаратная платформа для беспроводной телеметрии

Ключевые слова: программно-аппаратная платформа, беспроводная телеметрия.

Цель работы: разработка единой программно-аппаратной платформы для обеспечения беспроводной телеметрии.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ существующих методов и принципов построения беспроводных сетей в области телеметрии. Выявлено, что в настоящее время в отечественных и зарубежных источниках недостаточно освещён вопрос сбалансированности, энергоэффективности, спектральной эффективности и надёжности доставки данных в телеметрии. Предложен и реализован (на примере датчиков для слежения за активностью животных) принцип единой программно-аппаратной платформы для беспроводной телеметрии, отвечающий требованиям сбалансированности по дальности передачи, энергоэффективности, надёжности доставки сигнала. Разработана методика для моделирования печатных антенн с последующим анализом диаграммы направленности, позволяющая выбрать оптимальное решение для обеспечения стабильной передачи данных на расстоянии в телеметрии.

Степень использования: результаты магистерской работы были внедрены в учебный процесс УО «БГУИР».

Область применения: системы удаленного доступа, системы для сбора и мониторинга в ЖКХ, системы распознавания домашних животных в сфере сельского хозяйства.

SUMMARY

Ageev Alexey Viktorovich

Software and hardware platform for wireless-telemetry

Keywords: hardware and software platform, wireless telemetry.

The object of study: Development of a unified software and hardware platform for providing wireless telemetry.

The results and novelty: The analysis of existing methods and principles of construction of wireless networks in the field of telemetry is carried out. It is revealed that at present in domestic and foreign sources the issue of balance, energy efficiency, spectral efficiency and reliability of data delivery in telemetry is not adequately covered. The principle of a single software and hardware platform for wireless telemetry that meets the requirements of the balance of transmission range, energy efficiency, and reliability of signal delivery is proposed and implemented (with the example of sensors for monitoring animal activity). A technique for simulating printed antennas has been developed, followed by analysis of the directional pattern, which allows choosing the optimal solution to ensure stable data transmission over distance in telemetry.

Degree of use: the results of the master's work were introduced in the educational process of «BSUIR».

Sphere of application: remote access systems, systems for collecting and monitoring in the housing and communal services, the system of recognition of domestic animals in the field of agriculture.