

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Ниязов Равиль Баратович

Тема: «Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях  
мегаполиса»

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 6В06201 – Телекоммуникации

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий



**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях  
мегаполиса»

6B06201 – Телекоммуникация

Выполнил  
Рецензент

к.т.н, доцент АУЭС им. Г.Даукеева

 Байкенов А.С.

«23» мая 2024 г.



Ниязов Р.Б.

Научный руководитель

к.т.н, ассоциированный профессор

 Дараев А.М.

«23» мая 2024 г.



Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт автоматизи и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Специальность 6В06201 - Телекоммуникация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭТиКТ

Таштай Е.Т.

« 30 » декабря 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Ниязов Равиль Баратович

Тема: «Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса»

Утверждена приказом Ректора Университета № 548 П/Ө от «4» декабря 2023 года.

Срок сдачи законченной работы « 30 » мая 2024 г.

Исходные данные к дипломной работе:

- а) Анализ ЭМС , для БПЛА в условиях мегаполиса
- б) Анализ излучаемых электромагнитных помех ВЛЭП
- в) Тестирование и оценка радиочастотной помехоустойчивости беспилотных летательных аппаратов для осмотра мостов
- г) Обеспечение ЭМС БПЛА в условиях мегаполиса

Краткое содержание к дипломной работе:

- а) Разработка приемопередатчика для БПЛА, для устойчивого работы в условиях радиопомех в мегаполисе.
- б) Разработка устройств для защиты от помех радиоканалов.
- в) Разработка модели воздействия радиочастотного шума на БПЛА на модели MATLAB/Simulink.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): представлены 10-15 слайдов презентации работы.



1. Общий вид помеховой обстановки в условиях мегаполиса
2. Структурная схема радиопередатчика коптера
3. Принципиальная электрическая схема приемопередатчика и устройства защиты от помех коптера.

Список литературы:

- 4 Петровский В. И., Седельников Ю. Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
5. Хачикян В. С. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пособие. – Алматы, 2013. – 68 с.
6. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи. Под ред. Л. Я. Кантора, В. В. Ноздрина. – М.: НИИР, 2009. – 280 с.
7. Michel A. H. Counter-drone systems. – Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018 – 23 с.
8. Countering rogue drones. – FICCI Committee on Drones, EY, 2018 – 31 с.



## ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ помеховой обстановки и ЭМС в условиях мегаполиса	10.01.2024 - 20.01.2024 г.	Отчет – не менее 5-10 стр и 1-2 слайда
Разработка приемопередатчика для БПЛА, для работы в условиях радиопомех в мегаполисе	20.01.2024-10.03.2024 г.	Отчет не менее 5-10 стр , 1-2.
Разработка модели приемопередатчика и устройств защиты от помех радиоканалов	11.03.2024 - 28.04.2024 г.	Отчет не менее 10 стр . 3-5 слайдов 5
Заключение	01.04.2024 - 31.04.2024 г.	Отчет не менее 1 стр , 10 слайд

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

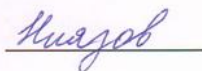
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Ассоциированный профессор, кандидат технических наук Дараев А.М.	31.05.2024	
Нормоконтролер	Старший преподаватель каф. ЭТиКТ, Доктор Ph.D. Досбаев Ж.М.	31.05.2024	

Научный руководитель



Дараев А.М.

Задание принял к исполнению студент



Ниязов Р.Б.

Дата

«30» декабря 2023 г.

## АННОТАЦИЯ

Мегаполис жағдайында ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ұшқышсыз ұшу аппараттарын) пайдалану олардың радиоарналарының электромагниттік үйлесімділігіне (ЭМС) байланысты бірқатар қоңырауларға тап болады. Қалалық орта әртүрлі электромагниттік кедергі көздерімен, соның ішінде мобильді желілермен, Wi-Fi, теледидар және радио таратқыштармен, сондай-ақ радиожиілік диапазонында жұмыс істейтін басқа құрылғылармен қаныққан. Бұл факторлар байланыс сапасына және ұшқышсыз ұшу аппараттарын басқаруға теріс әсер етуі мүмкін, бұл басқаруды жоғалту және төтенше жағдайлар қаупін арттырады. Бұл жұмыста мегаполис жағдайында ҰҰА радиоарналарының ЭМС қамтамасыз етуінің негізгі аспектілері қарастырылады. Кедергі көздері, олардың радиоарналарға әсері талданды және байланыстың сенімділігі мен тұрақтылығын арттыру әдістері мен технологиялары ұсынылды. Эксперименттік зерттеулер мен компьютерлік модельдеу жүргізілді, олардың нәтижелері қалалық жағдайда UAV радиоарналарының ЭМЖ жақсарту үшін ұсынылған шешімдердің қажеттілігі мен тиімділігін растайды.

## АННОТАЦИЯ

В условиях мегаполиса использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сталкивается с рядом вызовов, связанных с электромагнитной совместимостью (ЭМС) их радиоканалов. Городская среда насыщена различными источниками электромагнитных помех, включая мобильные сети, Wi-Fi, телевизионные и радиопередатчики, а также другие устройства, работающие в радиочастотном диапазоне. Эти факторы могут негативно влиять на качество связи и управление БПЛА, что повышает риск потери управления и возникновения аварийных ситуаций. В данной работе рассматриваются основные аспекты обеспечения ЭМС радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса. Проанализированы источники помех, их воздействие на радиоканалы, а также предложены методы и технологии для повышения надежности и устойчивости связи. Проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование, результаты которых подтверждают необходимость и эффективность предложенных решений для улучшения ЭМС радиоканалов БПЛА в городских условиях.

## ANNOTATION

In a megalopolis, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) faces a number of challenges related to the electromagnetic compatibility (EMC) of their radio

channels. The urban environment is saturated with various sources of electromagnetic interference, including mobile networks, Wi-Fi, television and radio transmitters, as well as other devices operating in the radio frequency range. These factors can negatively affect the quality of communication and control of the UAV, which increases the risk of loss of control and emergency situations. This paper discusses the main aspects of providing EMC for UAV radio channels in a megalopolis. The sources of interference and their impact on radio channels are analyzed, and methods and technologies are proposed to improve the reliability and stability of communication. Experimental studies and computer modeling have been carried out, the results of which confirm the need and effectiveness of the proposed solutions to improve the EMC of UAV radio channels in urban conditions.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
1 Анализ ЭМС , для БПЛА в условиях мегаполиса	10
1.1 Электромагнитные помехи в конструкции летательного аппарата	10
1.2 Небольшие беспилотные летательные аппараты	14
1.3 Полезные нагрузки	20
2 Анализ излучаемых электромагнитных помех ВЛЭП	27
2.1 Излучаемые электромагнитные помехи ВЛЭП	27
2.2 Моделирование электромагнитных помех в линиях связи системы управления БПЛА	29
2.3 Моделирование функционирования элементов электронной системы БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех ВЛЭП	31
3 Тестирование и оценка радиочастотной помехоустойчивости беспилотных летательных аппаратов для осмотра мостов	33
3.1 Дизайн и оборудование для эксперимента	33
3.2 Процедура тестирования и результаты эксперимента	34
3.3 Анализ результатов теста	39
4 Обеспечение ЭМС БПЛА в условиях мегаполиса	42
4.1 Воздействие радиочастотного шума на беспилотные летательные аппараты условиях мегаполиса	42
4.2 Методы минимизации воздействия радиочастотного шума	43
4.3 Расчет электромагнитной совместимости радиоканалов беспилотных летательных аппаратов в условиях мегаполиса	44
Заключение	48
Список использованной литературы	50



## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитная совместимость (ЭМС) радиоканалов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях мегаполиса представляет собой сложную и важную задачу, от решения которой зависит надежная и безопасная эксплуатация беспилотных систем в городских условиях. В последние годы БПЛА получили широкое распространение и нашли применение в самых различных областях, включая логистику, мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство, охрану правопорядка и инфраструктурные инспекции. Однако использование БПЛА в условиях мегаполиса сталкивается с уникальными вызовами, связанными с высокой плотностью электронных устройств и сложной электромагнитной обстановкой.

В мегаполисах присутствует огромное количество источников электромагнитного излучения: от радиопередатчиков и базовых станций сотовой связи до бытовых и промышленных устройств. Это создает насыщенную и часто неблагоприятную радиочастотную среду, где различные устройства могут создавать взаимные помехи, снижать качество связи и даже приводить к полным потерям управления и передачи данных. БПЛА, работающие в таких условиях, должны обладать высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и обеспечивать стабильную и надежную связь.

ЭМС — это способность электронного оборудования работать без значительного воздействия друг на друга и на окружающую среду в условиях общего электромагнитного поля. Для БПЛА это означает, что их радиоканалы должны быть защищены от внешних помех, а сами беспилотники не должны создавать значительные помехи для других систем. Решение задачи обеспечения ЭМС требует комплексного подхода, включающего использование современных технологий модуляции и кодирования, эффективного управления частотным спектром, применения методов фильтрации и экранирования, а также разработки устойчивых к помехам протоколов связи.

Целью данного исследования является рассмотрение основных аспектов электромагнитной совместимости радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса, анализ текущих проблем и вызовов, а также предложений по методам и технологиям, которые могут быть использованы для их решения. В работе будут рассмотрены теоретические основы ЭМС, влияющие факторы, практические примеры и перспективы развития технологий для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации БПЛА в условиях городской среды.

## **1 Анализ ЭМС , для БПЛА в условиях мегаполиса**

### **1.1 Электромагнитные помехи в конструкции летательного аппарата**

Классификация электромагнитных помех, воздействующих на летательный аппарат

Источники ЭМП, воздействующих на бортовое оборудование летательного аппарата.

Помехи, воздействующие на ЛА можно подразделить на помехи естественного происхождения и помехи искусственного происхождения. На рисунке 1 приведены основные источники ЭМП. К источникам естественных ЭМП ,воздействующих на ЛА относятся грозовые разряды, электростатические разряды и электромагнитные излучения атмосферы и космоса, а так же НЛО.

Источники искусственных ЭМП, в свою очередь, делятся на источники преднамеренных и помех. В число непреднамеренных источников ЭМП входят различные транспортные, промышленные и индустриальные системы, системы связи и навигации, различные радиопередающие и радиолокационные станции. Источниками преднамеренных ЭМП относятся к категории средства РЭБ (радиоэлектронной борьбы), применяются для целенаправленного вывода из строя технических средств ЛА. Это могут быть генераторы сверхкоротких импульсов или взрывоманнитные генераторы (генераторы сверхширокополосных импульсов).

В число непреднамеренных источников можно отнести помехи, создаваемые некоторыми техническими средствами ЛА, воздействующими на другие.

Естественные источники ЭМП. Грозовые разряды

Грозовой разряд – наиболее опасное для летательных аппаратов природное явление. Грозовой разряд является источником мощных электромагнитных помех в виде импульсного тока (молнии) в атмосфере и сопутствующего ему электромагнитного поля.

Грозовой разряд начинается с лидерной стадии, которая возникает при напряженностях порядка  $1-3 \cdot 10^6$  В/м и следующим за ней главным разрядом, который и является основным источником мощного импульсного электромагнитного поля. Часто разряды бывают многократными (в среднем до 15) с интервалами времени 0,001- 0,5с причем последующие разряды слабее предыдущих.

Электростатические разряды

Электростатические разряды могут возникать на борту атмосферных и космических летательных аппаратов вследствие их общего или (и) дифференциального заряжения вследствие трибоэлектрического эффекта, т.е. трения проводящих и диэлектрических поверхностей его конструкции о воздух, частиц атмосферных осадков (снег, дождь), пыли.

Коронные разряды представляют собой импульсы с амплитудным значением

~10 мА, фронтом ~10нс и длительностью ~100 нс. Коронные разряды создают широкополосные излучаемые электромагнитные помехи, которые могут существенно ухудшать работу радиоэлектронных средств. Излучаемые помехи, возникающие от искровых пробоев диэлектрических поверхностей с частотным спектром ~10-1000 МГц также могут оказывать влияние на работу радиоэлектронных устройств летательных аппаратов.

Заряжение космических аппаратов происходит в условиях пролета через области космической плазмы с высокой концентрацией элементарных частиц, обладающими энергией ~10-100 кэВ. Накопление электрических зарядов на проводящей конструкции космического аппарата приводит к общему заряджению, неодинаковое распределение зарядов на поверхностях и в объеме диэлектрических материалов вызывает дифференциальное заряджение, что приводит к возникновению различных типов электростатических разрядов.



Рисунок 1.1 – Источники электромагнитных помех

### Геомагнитные возмущения

Геомагнитные возмущения возникают в результате солнечной активности, период которой составляет приблизительно 12 лет. Выбрасываемые Солнцем в период наибольшей активности элементарные частицы (электроны протоны),

поток которых в космическом пространстве называют «солнечным ветром» при приближении к Земле захватывается ее магнитным полем. В результате в магнитосфере Земли образуются области высокой концентрации элементарных частиц. Высокочастотное излучение областей околоземного космического пространства с высокой концентрацией элементарных частиц, спектр которого лежит в пределах 100 МГц-1000 МГц может значительно ухудшать радиосвязь и работу бортовых радиоэлектронных приборов и систем.

Неопознанные летающие объекты.

Неопознанные летающие объекты, предположительно, в ряде случаев представляют собой плазменные образования конечных размеров, диско или сигарообразной формы, перемещающиеся в пространстве по сложным траекториям. При описании случаев пролета на близком расстоянии от неопознанных летающих объектов пилоты отмечали отличное от нормального поведение бортовых приборов, а также временное нарушение радиосвязи. Несмотря на то, что специальных исследований, в силу случайности встречи летательных аппаратов с неопознанными летающими объектами не проводилось, можно сделать предположение о том, что указанные объекты на близком расстоянии создают сильное электромагнитное поле, достаточное для того чтобы существенно ухудшить качество функционирования бортовых приборов и систем летательных аппаратов.

Искусственные источники электромагнитных помех. Электромагнитный импульс ядерного взрыва.

Ядерный взрыв является источником мощного импульсного электромагнитного поля, так называемого электромагнитного импульса ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). Электромагнитный импульс создается импульсным электронным током, образующимся внутри взрыва в силу происходящих там физических процессов преобразования ядерной энергии в электромагнитную. Электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля изменяются во времени приближенно по аperiodическому закону.

Параметры электромагнитного импульса зависят от мощности, высоты взрыва (если он высотный), расстояния от центра взрыва. Многообразие параметров сведены к набору стандартных параметров для электрического и магнитного полей. Параметры ЭМИ ЯВ:

- $E=50$  [кВ/м];
- $H=133$  [кА/м];
- Длительность фронта – 2,3 нс;
- Длительность импульса – 23 нс.

Индустриальные источники электромагнитных помех.

К основным индустриальным источникам электромагнитных помех относят: высоковольтные научно-исследовательские и производственные установки; высоковольтные линии электропередач; контактная сеть железно-



дорожного и электрического транспорта. Перечисленные источники представляют опасность только для низколетящих атмосферных аппаратов, несмотря на то, что они могут создавать импульсные поля с большими напряженностями электрического и магнитного поля. Электромагнитные поля создаваемые указанными источниками имеют локальный характер, их напряженность уменьшается при увеличении расстояния  $R$  от источника по закону  $\sim (1/R^2 \div 1/R^3)$  и помимо этого их появление может носить случайный характер. Поэтому поля таких источников могут представлять опасность для низколетящего аппарата, находящегося в момент их возникновения, например, в случае аварийного режима, на расстоянии в несколько десятков метров от источника.

Следует отметить, что маршруты полета самолетов планируются с учетом расположения передающих антенн радиовещательных станций и соответственно вне областей, где напряженности электромагнитного поля превышает допустимые для бортовых систем значения.

#### Электромагнитное оружие и средства РЭБ

Электромагнитным оружием называются технические средства, предназначенные для создания преднамеренных электромагнитных помех в виде импульсных электромагнитных полей и полей высоких и сверхвысоких частот с целью ухудшения качества функционирования, нарушения режимов работы, полному нарушению работоспособности и выходу из строя электронных элементов, устройств приборов и систем летательных аппаратов.

К основным типам электромагнитного оружия относят: взрывомагнитные генераторы; установки сверхширокополосных импульсов; установки излучения в микроволновом диапазоне.

Взрывомагнитные генераторы являются одноразовыми устройствами, позволяющими на основе энергии используемого взрывчатого вещества в течение нескольких микросекунд изменить параметры индуктивной части специально сконструированного  $R, L, C$  контура, что позволяет увеличить первоначально протекающий в контуре ток до значений  $10^7$  А и таким образом создать сверхсильное магнитное поле с высокой плотностью энергии, достигающей  $1 \text{ кДж/см}^3$ , мощностью до 10 ГВт. Создаваемое импульсное сверхсильное электромагнитное поле является ненаправленным и локальным и поэтому деструктивно воздействует на бортовые электронные приборы и системы летательных аппаратов в радиусе от нескольких десятков до сотен метров. Использование взрывомагнитного генератора, с целью деструктивного воздействия на бортовую электронную аппаратуру связано с необходимостью его установки на средствах доставки его к летательному аппарату на траектории его полета.

Установки сверхширокополосных импульсов состоят из генераторов импульсов малой длительности и излучающих антенн. Различные типы существующих установок позволяют создавать направленное импульсное

электромагнитное поле в следующем диапазоне параметров:

- длительность импульсов  $(0,1-3) \cdot 10^{-9}$ с;
- длительность фронта импульса  $(85-250) \cdot 10^{-12}$ с;
- амплитудное значение импульсного электромагнитного поля 56кВ/м на расстоянии 100м (у наиболее совершенных установок)
- частоты генерирования импульсов для различных установок могут варьироваться от сотен герц до нескольких килогерц.

Импульсы передаются групповыми последовательностями (пачками) длительностью (1-30) с интервалом 1с.

Воздействие электромагнитного поля от установок сверхширокополосных импульсов на бортовые системы летательных аппаратов по сравнению с электромагнитным импульсом ядерного взрыва, при сопоставимых амплитудных напряженностях электрического поля более эффективно в смысле ухудшения качества функционирования и потери работоспособности вследствие меньших значений длительности фронта импульсов и их повторяемости.

Установки микроволнового излучения создают направленное электромагнитное поле с относительно большой напряженностью на значительном расстоянии. Установка с генератором, работающем на частоте 3ГГц с выходной мощностью 2 кВт, подключенном к излучающей антенне площадью 93,5 м<sup>2</sup> создает направленное электромагнитное поле с напряженностью электрической составляющей  $E=600$  В/м на расстоянии 10 км от антенны. Нахождение летательных аппаратов в зоне действия установки микроволнового излучения может представлять опасность для бортовых электронных систем, в частности для работы бортового вычислительного комплекса.

Косвенным подтверждением может служить следующий факт. Облучение персонального компьютера электромагнитным полем в частотном диапазоне от 1 до 3 ГГц с напряженностью электрической составляющей 100 В/м приводит к потере данных, ошибках при выполнении программы и необходимости перезагрузки.

Электромагнитное оружие на основе установок микроволнового излучения и генераторов сверхширокополосных импульсов может эффективно применяться в военных целях против летательных аппаратов различного назначения.

## **1.2 Небольшие беспилотные летательные аппараты**

Оставляя в стороне исторические модели самолетов, где двигатель на этаноле и серводвигатели управлялись высокочастотным или УКВ-передатчиком, следующие общие характеристики применимы к небольшим беспилотным летательным аппаратам:

- Передатчики управления восходящей линией связи обычно работают в диапазоне 2,4 ГГц

- Передачи управления восходящей линией связи представляют собой некоторую форму цифровой модуляции с расширенным спектром

- Телеметрия по нисходящей линии связи (для определения местоположения, напряжения батареи и другой информации о состоянии) присутствует не всегда, но также может работать по каналу связи с частотой 2,4 ГГц

- Беспилотник может принимать небольшую полезную нагрузку, такую как камера и/или карданный подвес, которые могут быть установлены неквалифицированным пользователем

- Некоторые полезные нагрузки могут питаться от основной (единственной) батареи беспилотного летательного аппарата.

- Некоторые полезные нагрузки могут включать в себя радиопередатчики

Диапазон частот 2,4 ГГц предпочтителен для управления малыми беспилотными летательными аппаратами по ряду причин: легко доступны радиомодули, доступ к спектру открыт для общественности (диапазон 2,4 ГГц является одним из международно согласованных промышленных, научных и медицинских диапазонов) и международные правила по мощности передачи таковы, что недорогая система может обеспечить комфортную дальность действия в 1 км в условиях прямой видимости. Кроме того, длина волны позволяет использовать недорогие, но эффективные всенаправленные антенны удобного размера.

Чтобы понять сценарий возникновения помех при работе небольших беспилотных летательных аппаратов, необходимо иметь представление о технологии дистанционного управления, поскольку наибольшим риском для безопасного полета беспилотного летательного аппарата является потеря управляющего сигнала от передатчика. В то время как небольшие беспилотные летательные аппараты обладают различными возможностями автономного полета, неожиданная потеря управляющего сигнала, как правило, вызывает непредвиденную реакцию и сопутствующий риск получения травм, повреждения имущества или потери транспортного средства.

Существует множество разнообразных скоростей передачи данных и схем модуляции, которые используются в диапазоне 2,4 ГГц - вездесущими примерами являются Bluetooth и 802.11b/g Wi-Fi. Большинство систем с частотой 2,4 ГГц, используемых в потребительских и промышленных приложениях, в том числе вне контроля беспилотных летательных аппаратов, являются радиосистемами с “расширенным спектром”, где занимаемая полоса пропускания передаваемого сигнала больше, чем полоса пропускания данных в базовом диапазоне. Эти различные системы обладают характеристиками, подходящими для различных применений - например, Wi-Fi стандарта 802.11b/g обеспечивает высокую скорость передачи данных (приблизительно до

54 Мбит/с), но имеет большую занимаемую полосу пропускания и более чувствителен к помехам со стороны других пользователей спектра, чем, например, Bluetooth (примерно до 1,5 Мбит/с), который использует скачкообразную перестройку частоты и занимает примерно такой же объем спектра.

Для управления малыми беспилотными летательными аппаратами предпочтение отдается частотно-скачкообразному расширенному спектру (FHSS), поскольку он более устойчив к помехам со стороны других пользователей спектра 2,4 ГГц, чем методы с фиксированным частотным расширением спектра. Даже на любительском рынке в один передатчик обычно встроено несколько технологий, поэтому команды передаются по схеме FHSS, но при каждом переходе используется расширенный спектр прямой последовательности (DSSS). DSSS смешивает данные базовой полосы (оцифрованные команды для беспилотного летательного аппарата) с кодовой последовательностью — таким образом, каждый бит данных базовой полосы представлен последовательностью кодовых битов (множественный доступ с кодовым разделением — CDMA). Отношение количества битов, передаваемых на один бит базовой полосы известен как “коэффициент расширения” или “коэффициент усиления обработки” — более высокий коэффициент расширения позволяет восстанавливать данные в приемнике в худших условиях соотношения сигнал/шум, чем при более низком коэффициенте расширения, но за счет снижения скорости передачи данных при той же занятой полосе радиочастотного диапазона. Команды беспилотного летательного аппарата не требуют высокой скорости передачи данных, поэтому можно использовать высокие коэффициенты распространения для создания максимально надежных каналов связи. Большинство Wi-Fi использует коэффициент расширения, равный 11, контроллеры небольших беспилотных летательных аппаратов используют коэффициент расширения около 64, а спутниковые сигналы GPS (которые являются CDMA, но не имеют скачкообразной перестройки частоты) используют коэффициент усиления обработки, равный 1024, так что данные могут быть извлечены из сигналов с очень низкой амплитудой. Чтобы получить интуитивное представление о возможностях распространения кода при выделении очень слабых сигналов из фонового шума, учтите, что анализатор спектра лабораторного класса, подключенный к подходящей антенне, направленной в небо, не может отображать сигналы с навигационных спутников. Он просто определяет амплитуду радиочастотной энергии, присутствующей в спектре, и не имеет возможности применять методы кодирования для извлечения информации из принятых сигналов; дисплей очень похож на шум. Напротив, небольшой GPS-приемник потребительского класса, который включает в себя необходимые схемы кодирования и обработки, может легко декодировать данные из спутниковых сигналов (и, скорее всего, делать фотографии и совершать телефонные звонки с повышенным коэффициентом усиления!).



Технология радиосвязи с распространением кода меняет правила игры для EMC, и ни одна инженерная проблема EMC не выдвигает ее на первый план так, как небольшие беспилотные летательные аппараты.

В восходящей линии связи для небольших беспилотных летательных аппаратов FHSS/DSSS/CDMA управляющие команды разбиваются на небольшие пакеты данных и передаются короткими узкополосными пакетами на отдельных частотах в диапазоне 2,4 ГГц - обычно 36 каналов, хотя возможны и другие схемы. Каналы передачи для каждого пакета данных выбираются в псевдослучайной последовательности, которая известна передатчику и приемнику, поэтому, как только приемник зафиксирует сигнал передатчика, он может отслеживать последовательность коротких, сравнительно узких передач. Таким образом, ряд аналогичных систем могут занимать одну и ту же полосу частот без видимых помех, поскольку они разделяют спектр по времени, коду и частоте. Поскольку скорость передачи данных, необходимая для управления небольшим беспилотным летательным аппаратом, невелика (то есть можно ожидать, что цифровые команды управления будут иметь низкую полосу пропускания, поскольку манипуляции оператора с элементами управления не являются быстрыми), наиболее эффективным использованием доступного спектра является оптимизация надежности с высоким коэффициентом расширения, сбалансирован с минимизацией времени работы в эфире для максимального увеличения срока службы батареи передатчика.

Радиосистемы такого типа, используемые в небольших беспилотных летательных аппаратах, по своей сути надежны с точки зрения их способности работать с другими передатчиками, работающими на близлежащих частотах, по сравнению с традиционными узкополосными супергетеродинными системами.

Способность радиоприемника функционировать на заданном уровне производительности при наличии нежелательного мешающего сигнала известна как его избирательность; заданным уровнем производительности может быть соотношение сигнал/шум и искажения для аналогового речевого приемника или частота битовых ошибок для цифрового приемника. Для традиционного радиоприемника, например, для узкополосного радиоприемника фиксированной частоты, используемого в авиационной связи в диапазоне УКВ, кривая селективности очень похожа на показанную на рисунке 1.2. Кривая селективности дает относительное представление о том, какой мощностью должен обладать нежелательный сигнал на входе приемника, чтобы нарушить прием требуемого сигнала.

Кривые такого рода могут быть получены путем тестирования радиоприемника двумя сигналами одновременно, обычно подаваемыми коаксиальными разъемами и адаптерами на входе в приемник. Первый сигнал - это требуемый сигнал, амплитуда которого немного превышает минимально необходимую для правильной работы приемника, а второй сигнал - это мешающий сигнал, обычно непрерывная волна (CW); частота этого сигнала

ступенчатая или охватывающая полосу частот, более широкую, чем рабочий канал приемника. На каждой частоте амплитуда интерферирующего сигнала регулируется таким образом, чтобы приемник выдавал заданный отклик, а кривая отображала уровень радиочастотной мощности, требуемой на входе тестируемого приемника, который необходим для снижения производительности приемника ниже его номинальной спецификации. На самом деле, во многих случаях уровень мощности мешающего сигнала вне диапазона ограничен выходной мощностью тестового генератора помех, а не самого тестируемого приемника, особенно когда тестируемый приемник использует хорошие радиочастотные входные фильтры. На рисунке 1.2 показано, что за пределами полосы пропускания канала для приемника требуется сравнительно высокая мощность помех, чтобы нарушить работу, но в пределах полосы пропускания канала требуется гораздо меньшая мощность. С точки зрения электромагнитной совместимости это сценарий помех “у входной двери”, при котором нежелательный сигнал помех поступает в систему жертвы (радиоприемник) по пути, предназначенному для приема других радиосигналов. При прохождении через входную дверь требуется очень мало энергии.

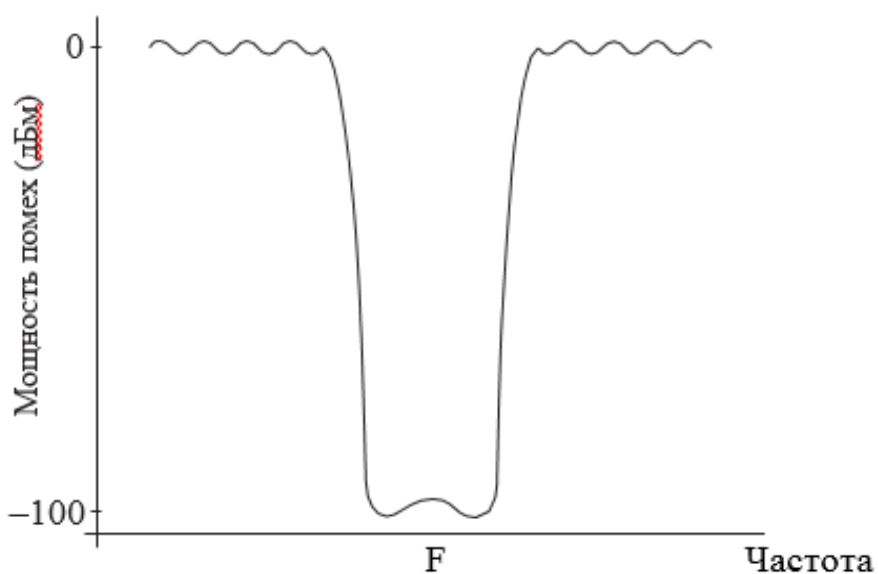


Рисунок 1.2 – Типичная кривая селективности для традиционного узкополосного супергетеродинного приемника

При использовании приемника с расширенным спектром кривая селективности, получаемая при проведении такого рода испытаний, значительно меньше. В случае комбинированного сигнала FHSS/DSSS, используемого в восходящих линиях связи небольших беспилотных летательных аппаратов, сигнал непрерывной помехи может вообще не приводить к снижению производительности приемника, поэтому вместо выемки, показанной на рисунке

1.2, кривая селективности может представлять собой горизонтальную линию или, возможно, кривую пологого сечения. Вспомним предыдущее обсуждение методов распространения кода: хотя непрерывный мешающий сигнал присутствует в полосе пропускания приемника с гораздо большей мощностью, чем требуемый сигнал, он не обладает желаемыми свойствами кодирования, поэтому приемник в меньшей степени способен “видеть” его. Кроме того, поскольку источник непрерывных помех по определению является очень узкополосным (фактически теоретически полоса пропускания равна нулю в соответствии с Фурье), он нарушает работу лишь небольшой части всего диапазона управления 2,4 ГГц — например, он может нарушить работу одного из 36 частотных каналов в сценарии управления беспилотным летательным аппаратом. Однако управляющие команды передаются много раз, поэтому все сообщение не встраивается в один пакет на одной частоте; в результате источник непрерывных помех не влияет на функциональные характеристики радиолинии. Чтобы нарушить такую связь, мешающий сигнал должен быть либо настолько мощным, что он приводит приемник к нелинейному сжатию, делая его бесполезным во всем диапазоне, либо иметь достаточно широкую полосу пропускания, чтобы нарушить значительную долю полосы расширенного спектра.

В случае аналогового приемника ухудшение характеристик из—за мешающего сигнала происходит постепенно - сигнал основной полосы частот (часто аудио) становится более шумным и искаженным, но остается разборчивым до тех пор, пока помехи не станут достаточно сильными, чтобы полностью заглушить нужный сигнал. После устранения или снижения уровня мешающего сигнала восстановление нормальной работы приемника обычно происходит довольно быстро.

В случае цифровой линии радиосвязи, используемой в системах управления малыми беспилотными летательными аппаратами, режимы сбоя являются более сложными и зависят от характера мешающего сигнала, физических свойств приемника и кодирования и обработки ошибок, которые общая приемная система использует для извлечения данных. Однако, как общая характеристика, сбой цифровой радиосвязи является нелинейным: пользователь цифровой радиолинии может наблюдать небольшие артефакты в принимаемых данных (например, пикселизацию видеосигнала или, по-видимому, вялую реакцию на элементы управления в беспилотном летательном аппарате), за которыми следует внезапная полная потеря связи. Более того, восстановление линии связи может потребовать существенного снижения мощности помех, поскольку установление цифровой линии связи - “привязка” приемника к частоте и коду передаваемого сигнала — является более сложной задачей, чем поддержание установленной линии связи. Этот процесс может занять несколько секунд; для сигнала управления беспилотным летательным аппаратом, практический вывод может заключаться в том, что связь не может быть

восстановлена до тех пор, пока контроллер и беспилотный летательный аппарат не будут соединены в гораздо лучших условиях распространения и без влияния мешающего сигнала.

### 1.3 Полезные нагрузки

Для небольших беспилотных летательных аппаратов одной из самых популярных полезных нагрузок является видео, и получение видео улучшается, когда оператор может видеть видеоизображения в режиме реального времени, поэтому нисходящая видеосвязь в режиме реального времени является весьма желательной функцией в беспилотном летательном аппарате.



Рисунок 1.3 – Небольшой беспилотник с установленной камерой Wi-Fi

На каждой из четырех посадочных опор беспилотника имеются неэкранированные провода. Две из них являются проводными антеннами для управляющего приемника с частотой 2,4 ГГц, одна лента предназначена для модуля компаса в нижней части ножки, а другая лента (не видна) предназначена для дополнительного карданного подвеса (не используется в данной установке). Передающая антенна Wi-Fi камеры встроена в модуль камеры и находится примерно в 50 мм от каждой из четырех опор и корпуса беспилотника.

На рисунке 1.3 показана возможная интеграция небольшого беспилотного летательного аппарата с камерой. Беспилотный летательный аппарат и камера производятся разными производителями; их спектры соответственно показаны на рисунках 1.4 и 1.5. Компактность сборки позволяет установить передатчик камеры Wi-Fi в непосредственной близости от ряда других систем на самом



беспилотнике, и, что наиболее важно, от приемника для управления команды. Такая интеграция может вызвать проблемы с электромагнитной совместимостью БПЛА. Передача видеосигнала по нисходящей линии связи почти наверняка сделает непригодной для использования треть каналов управления FHSS, а в зависимости от характеристик подавления нежелательного сигнала внутри диапазона приемника, возможно, и больше. Трудность с внедрением такого рода заключается в том, что первоначальные предполетные проверки системы (особенно проверка функциональности управления) вполне могут указывать на то, что система будет работать, поскольку передатчик находится очень близко к беспилотнику во время таких проверок, но как только беспилотник удаляется, может наблюдаться резкое сокращение дальности действия. от контроллера.

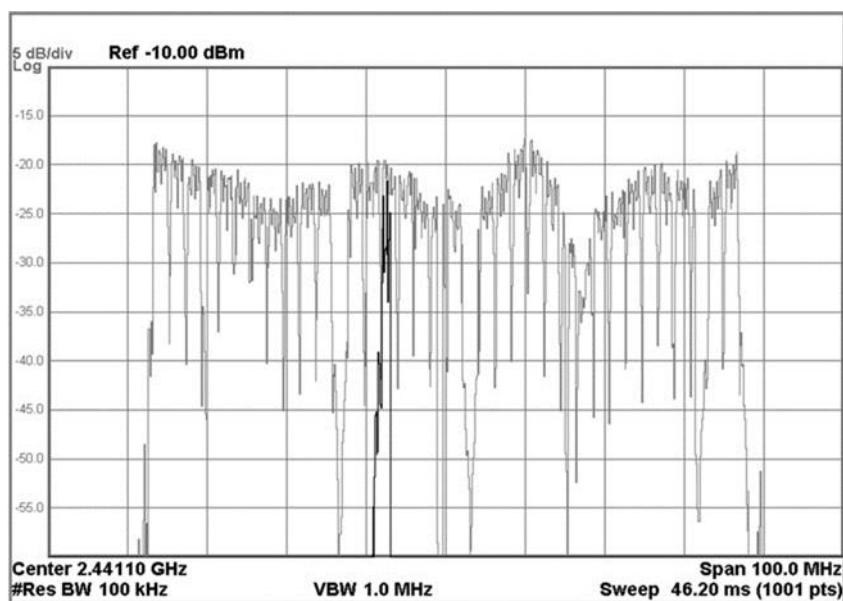


Рисунок 1.4 – Пример комбинации FHSS/DSSS для управления небольшим беспилотным летательным аппаратом

Светлая дорожка формируется в течение нескольких минут и показывает большую часть спектра, занятого контроллером, а темная дорожка представляет собой один пакет данных за один переход.

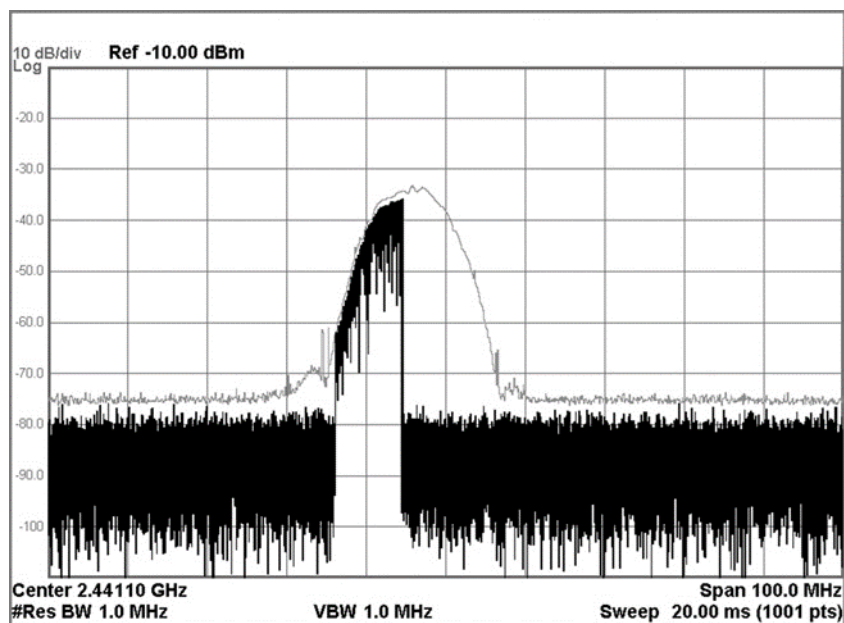


Рисунок 1.5 – Пример типичного сигнала камеры Wi-Fi с частотой 2,4 ГГц

Светлая дорожка создавалась в течение нескольких секунд, чтобы показать весь спектр, используемый камерой; темная дорожка представляет собой одиночный пакет данных.

В отличие от каналов управления беспилотными летательными аппаратами, нисходящий канал видеосвязи обеспечивает высокую скорость передачи данных и высокую пропускную способность. В этом случае используются методы DSSS с меньшим коэффициентом распространения и небольшой скачкообразной перестройкой частоты или вообще без нее. Это приводит к возникновению ситуации, когда передающий сигнал находится “в эфире” чаще, чем передача FHSS с низким рабочим циклом. Многие легкодоступные беспроводные видеосистемы работают в диапазоне 2,4 ГГц, и это создает серьезные проблемы с обеспечением электромагнитной совместимости для интегратора/оператора небольших беспилотных летательных аппаратов. На рисунке 1.4 показан спектр типичного контроллера небольшого беспилотного летательного аппарата, а на рисунке 1.5 показан спектр типичной Wi-Fi видеокамеры типа “экшн”, которую можно легко установить на небольшой беспилотный летательный аппарат.

На рисунке 1.6 показан сигнал Wi-Fi камеры, наложенный на сигналы управления БПЛА; для наглядности иллюстрации было применено смещение амплитуды. На этом рисунке показано, что камера занимает тот же спектр, что и приблизительно 12 из 36 каналов, используемых контроллером БПЛА.

Несовместимость между передачей полезной нагрузки и работой самого БПЛА может быть устранена несколькими способами:

– Передача полезной нагрузки в диапазоне, совершенно отличном от диапазона управления БПЛА (например, управление в диапазоне 5,8 ГГц с видео в диапазоне 2,4 ГГц).

– Передача полезной нагрузки интегрирована в систему под управлением единого контроллера — это позволяет координировать использование скачкообразного спектра для обеспечения того, чтобы передача полезной нагрузки происходила по разным каналам и/или в разное время для передачи управления по восходящей линии связи.

Влияние передающей полезной нагрузки или любой другой полезной нагрузки, если уж на то пошло, на восходящую линию управления беспилотного летательного аппарата можно оценить, выполнив тест на снижение чувствительности передатчика. Тест на снижение чувствительности позволяет определить потерю чувствительности приемника из-за присутствия источника потенциальных помех. Используя фактический управляющий передатчик и сравнивая характеристики с и без потенциального источника помех реакция беспилотного летательного аппарата на системном уровне может быть оценена, что позволяет беспилотному летательному аппарату использовать любые адаптивные методы, которые могут потребоваться для управления помехами - например, он может скорректировать использование скачкообразных каналов, чтобы избежать каналов, в которых он обнаружил помехи.

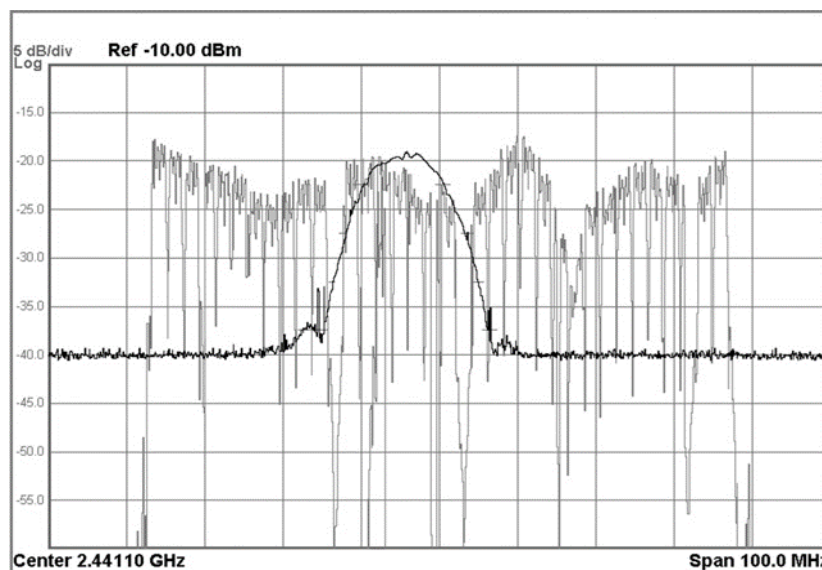


Рисунок 1.6 – Комбинация спектра контроллера БПЛА (светлые следы) со спектром камеры Wi-Fi (темные следы), показывающая перекрытие в заполнении спектра

Ключевыми шагами являются:

(1) создание тестовой установки, в которой сигнал передатчика может быть подключен к тестируемому приемнику с помощью переменных коаксиальных

аттенюаторов. Обычно это влечет за собой размещение передатчика или приемника в подходящем экранированном корпусе, чтобы предотвратить попадание утечки из передатчика в приемник с достаточной интенсивностью для обеспечения нормальной работы. Сигнал может подаваться с выхода аттенюаторов на тестируемый приемник через подходящую соединительную антенну или другую конструкцию. Пример подходящей настройки показан на рисунке 1.7.

(2) Установите переменные аттенюаторы на ноль и установите базовую характеристику приемника “нормальная производительность” (в случае небольшого беспилотного летательного аппарата подходящую индикацию может обеспечить стационарная лампа на транспортном средстве; убедитесь, что беспилотный летательный аппарат соответствующим образом привязан, поскольку потеря сигнала во время тестирования может привести к вызвать реакцию “лети домой”). Сильно нелинейный режим отказа радиолиний с расширенным спектром действия и высокий уровень избыточности в передающих средствах что статистический подход может быть полезен для определения базовой линии — например, критерием нормальной работы может быть то, что ссылка должна оставаться открытой в течение определенного периода времени.

(3) Увеличьте переменное затухание (обычно с шагом 10 и 1 дБ), чтобы определить величину затухания, необходимую для разрыва канала управления, о чем свидетельствует изменение поведения БПЛА по сравнению с исходным уровнем, установленным на этапе (2). Запишите эту настройку ослабления в качестве эталонного значения уровня. Если максимальное доступное затухание достигнуто без нарушения производительности, вполне вероятно, что при настройке на этапе (1) между передатчиком и приемником недостаточно радиочастотной изоляции и необходима дополнительная изоляция (экранирование и/или разделение).

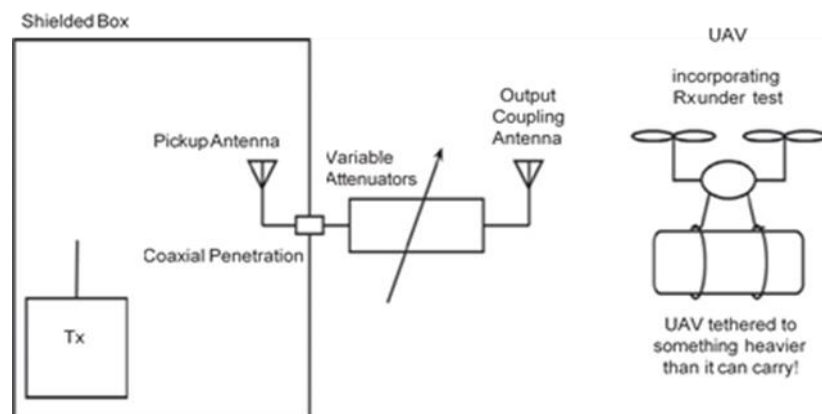


Рисунок 1.7 – Пример настройки теста чувствительности БПЛА для однонаправленной линии радиуправления

При условии, что экранированный блок обеспечивает достаточную изоляцию между передатчиком и приемником, БПЛА может быть расположен на удобном близком расстоянии от аттенюаторов, что позволяет легко контролировать работу. Убедитесь, что беспилотный летательный аппарат привязан и доступ к нему ограничен, чтобы предотвратить травму или повреждение из-за неожиданного поведения во время тестирования.

(4) Сбросьте переменные аттенюаторы на ноль и убедитесь, что восстановлена нормальная работа. Включите потенциальный источник помех (в данном примере передатчик Wi-Fi сам-ера) и следите за нормальной работой БПЛА. Когда беспилотный летательный аппарат не может достичь нормальной производительности даже при обнуленных переменных аттенюаторах, увеличьте эффективность связи передатчик—приемник в настройках, установленных на этапе (1), например, путем улучшения коэффициента усиления антенн связи или уменьшения расстояния между выходной антенной связи и беспилотным летательным аппаратом.

(5) Повторите тест на чувствительность, описанный на шаге (3), и запишите величину ослабления, необходимую для разрыва соединения, Аинт.

(6)  $D = \text{Анорм} - \text{Аинт}$  - снижение чувствительности управляющего соединения из-за вмешательства. Разница в количестве дБ между чувствительностью с источником и без него связана с потерей дальности действия уравнением потерь траектории Фрииса в свободном пространстве:

$$L = 20 \log_{10}(4\lambda d\lambda) \quad (1.1)$$

где  $L$  – потери на пути (дБ);

$d$  – расстояние (м);

$\lambda$  – длина волны (м), так что снижение чувствительности на 6 дБ равносильно уменьшению вдвое дальности действия БПЛА.

Усовершенствования этого подхода могли бы быть реализованы с использованием более экзотического оборудования, такого как направленные ответвители и измерители мощности для контроля уровня сигнала, а также аттенюаторы с плавной регулировкой для обеспечения более плавного изменения уровня связанного сигнала, чем более распространенные ступенчатые аттенюаторы. Кроме того, если канал управления БПЛА является частью интегрированной дуплексной системы (например, если БПЛА включает в себя нисходящий канал телеметрии с приемником, встроенным в контроллер), тогда необходимо будет использовать циркуляторы или направленные ответвители для разделения участков восходящей и нисходящей линий связи, чтобы можно было управлять потерями в тракте отдельно. Несмотря на эти сложности, описанный выше способ может быть реализован при сравнительно небольшом количестве специализированного оборудования и обеспечивает хорошее представление о деградации, которую полезная нагрузка может вызвать в канале

управления для однонаправленных систем или для дуплексных систем, где компонент нисходящей линии связи не является центральным для работы системы управления.

Такой тест был выполнен на примере, показанном на рисунке 1.3, с использованием настройки, показанной на рисунке 1.7. Несмотря на значительное перекрытие в использовании спектра, показанное на рисунке 1.6, между полезной нагрузкой и управляющими радиопередачами, не было явной потери чувствительности управления, когда Wi-Fi камеры были включены (то есть, значения Анорм и Аинт были одинаковыми). Мониторинг спектра, когда были активны как канал управления, так и канал камеры, подтвердил, что беспилотный летательный аппарат не выбирал каналы адаптивно (как ожидалось для этой системы управления только по восходящей линии); сделан вывод о том, что в передаче управления этой конкретной системой беспилотного летательного аппарата имеется достаточная избыточность, позволяющая допускать потерю примерно трети ее каналов в течение некоторого времени (следует отметить, что ни камера, ни управляющий передатчик не передают непрерывно).

Однако тесты также показали, что даже без работы Wi-Fi камеры восстановление восходящей линии связи после ее разрыва потребовало увеличения уровня сигнала примерно на 20 дБ по сравнению с уровнем, при котором связь была прервана. Это резко контрастирует с результатом аналоговой радиочувствительности, когда нормальная работа приемника восстанавливается при увеличении сигнала на 3 дБ или менее выше уровня, при котором сигнал теряется. С точки зрения практических последствий для эксплуатации БПЛА, это означает, что в случае потери управления либо из-за помех, либо из-за выхода БПЛА за пределы досягаемости, для восстановления блокировки необходим гораздо более сильный сигнал. Тогда возможный сценарий заключается в том, что небольшой беспилотный летательный аппарат, потеряв свой управляющий сигнал, переходит в режим “лети домой” и начинает возвращаться к своей инерциальной/ GPS-привязке местоположение (место запуска, если все в порядке). Большую часть этого времени беспилотник может оставаться невосприимчивым, поскольку он должен находиться в пределах досягаемости, чтобы уровень сигнала был достаточным для повторного получения блокировки. Если в программировании БПЛА не предусмотрена функция “лететь домой”, а вместо этого он переходит в режим “мягкой посадки” или другой безопасной процедуры восстановления, возможна потеря БПЛА, в зависимости от того, где он находится в момент потери управляющего сигнала.

## **2 Анализ излучаемых электромагнитных помех ВЛЭП**

### **2.1 Излучаемые электромагнитные помехи ВЛЭП**

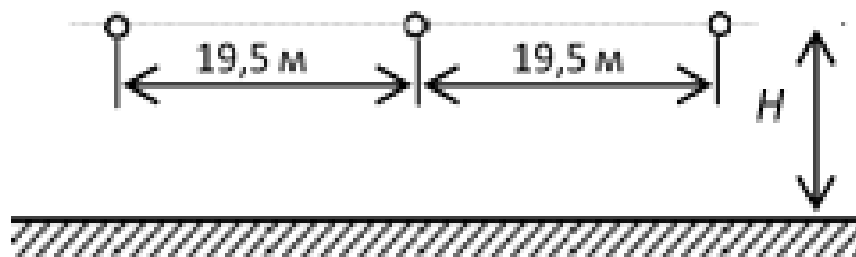
Кроме естественных источников, внешние электромагнитные воздействия на электронные системы, в том числе на элементы бортовых электронных систем БПЛА, формируются от функционирования технических средств, которые подразделяются на промышленные источники и радиопередающие средства. Промышленные источники относятся к классу помех от электротехнических, электронных и радиоэлектронных устройств (в последних кроме излучения через антенну), используемых в быту, промышленности, транспортных объектах, медицине и научных исследованиях. Действие помех этого класса на рецепторы проявляется в большинстве случаев в виде импульсных процессов, характеристики которых зависят от типа конкретного устройства (ВЛЭП, контактная сеть электротранспорта, электродвигатель и т.п.). Вследствие разнообразности промышленных источников электромагнитная помеха распространяется в диапазонах частот от десятков герц до 1 ГГц, а в ряде случаев до более высоких частот.

Наиболее распространенным и мощным источником промышленных электромагнитных помех являются ВЛЭП. Развитие энергетики немыслимо без постоянного увеличения производства электроэнергии и создания новых систем ее распределения. Объединение электрических сетей в крупные энергетические системы, вплоть до Единой энергетической системы страны, приводит к созданию мощных линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения. Наиболее распространенным видом ВЛЭП являются воздушные линии, выполненные голыми проводами, подвешенными на изоляторах и смонтированными на опорах.

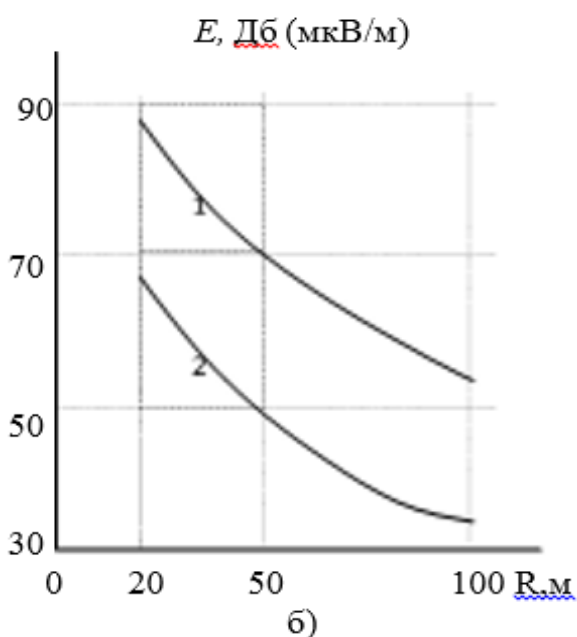
Электромагнитные помехи от ВЛЭП необходимо различать два их типа: 1) электромагнитные воздействия, возникающие за счет напряжений и токов рабочей частоты. В данном случае большое влияние на режимы работы ВЛЭП оказывают перенапряжения, которые являются причиной повышения амплитуды наибольшего рабочего напряжения электрической сети и генерирования электромагнитных помех большой мощности. При таких режимах ВЛЭП источниками электромагнитных помех, как правило, становятся токи и напряжения основной частоты высоковольтной линии; 2) высокочастотные излучаемые помехи от ВЛЭП, возникающие за счет некоторых физических эффектов (основной спектр от 0,15 МГц до 4 МГц) – коронных разрядов на проводах, изоляторах или арматуре, которые создают импульсы тока, поступающие на провода линии. Эти импульсы распространяются по проводам в обоих направлениях от места их образования. В полосе частот от 0,15 МГц до нескольких мегагерц помехи являются, в основном, результатом распространения импульсов тока вдоль ВЛЭП. Прямое электромагнитное излучение от этих импульсов существенно не меняет уровень помех. При



распространении, электромагнитные помехи, из-за небольшого их затухания, определяются по суммарному воздействию всех разрядов, возникающих на участках ВЛЭП, протянувшейся на много километров по обе стороны от места наблюдения. В непосредственной близости от ВЛЭП преобладает поле основной частоты, а на некотором удалении от нее преобладает поле излучения.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Расположения проводов ВЛЭП (а) и напряженности излучаемых помех (б) (напряжение 750 кВ): 1 – при сильном дожде; 2 – при хорошей погоде

Основной характеристикой излучаемых помех от ВЛЭП является частотный спектр. Для облегчения прогнозирования излучаемых помех от ВЛЭП пользуются стандартными спектрами (рисунок 1). За базисную принята величина на частоте 0,5 МГц. Этот спектр можно представить в виде формулы:

$$\Delta E = 5 [1 - 2 (\lg 10 f^2)] \quad (2.1)$$

где  $\Delta E$  – изменение уровня излучаемых помех на частоте измерения относительно уровня помех на частоте 0,5 МГц, дБ;

$f$  – частота измерения в полосе 0,15–4 МГц.

Например, если предположить, что максимальный уровень излучаемых помех от высоковольтных ВЛЭП достигает  $E_{дб}=85$  Дб (относительно 1 мкВ/м, на базисном расстоянии  $R=20$  м) на частоте 0,5 МГц, можно определить данные для различных частот в размерности измерения напряженности  $E$  – В/м (таблица 2.1). Данные результаты подтверждены измерениями, проведенными примерно на пятидесяти различных ВЛЭП в течение долгого времени.

Таблица 2.1 – Уровни излучаемых электромагнитных помех от ВЛЭП

Частота, МГц	Уровень помех относительно уровня на частоте 0,5 МГц, В/м	Частота, МГц	Уровень помех относительно уровня на частоте 0,5 МГц, В/м
0,15	0,028184	1	0,009440
0,2	0,027542	1,5	0,005689
0,3	0,024266	2	0,003758
0,5	0,017790	3	0,001950
0,8	0,011885	4	0,001189

## 2.2 Моделирование электромагнитных помех в линиях связи системы управления БПЛА

Распространяющиеся от ВЛЭП излучаемые электромагнитные поля воздействуют на контура (линии связи и часть возвратного проводника) между электронными средствами БПЛА и наводят в них электромагнитные помехи (рисунок 2.2).

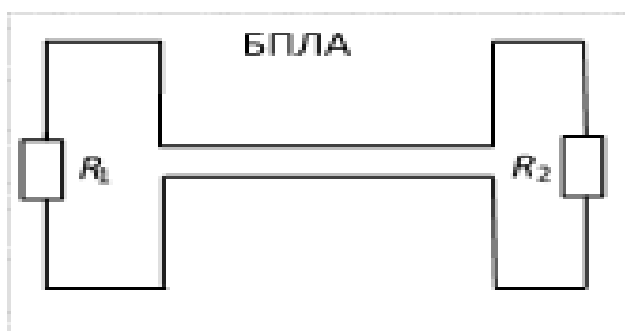


Рисунок 2.2 – Линия связи электронной системы БПЛА

Для анализа воздействия электрической составляющей поля ВЛЭП необходимо рассматривать линии связи как приемную дипольную антенну. При этом установившееся значение наведенного напряжения на нагрузке линий связи следующим образом:

$$U_E(t) = \frac{E_{max} l R_H}{2 \sqrt{R_H^2 + [\omega \cdot L - 1/(\omega C)]^2}} \sin(\omega \cdot t \cdot \psi \cdot \phi) \quad (2.2)$$

где  $E_{max}$  – максимальное значение электрической напряженности поля помехи, В/м;

$l$  – длина межсоединения (приемной антенны), м;

$R_H$  – сопротивление нагрузки, Ом;

$\omega$  – частота воздействия, Гц;

$L$  – индуктивность межсоединения, Гн;

$C$  – емкость межсоединения, Ф;

$\psi$  – начальная фаза;

$\phi$  – угол определяемый из равенства:

$$\phi = \arctg\{[\omega L - 1/(\omega C)]/(R_H R_{И})\}, \quad \pi/2 \geq \phi \geq -\pi/2, \quad (2.3)$$

где  $R_{И}$  – сопротивление излучения антенны (межсоединения) (35 Ом для дипольной антенны), Ом.

Так как длина линий связи в электронных средствах обычно не превышает 2-3 м ( $l$ ) то минимальная резонансная частота не снижается 100 МГц ( $f_p = c / 2 \cdot l$ ), где  $c$  – скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с). Поэтому для воздействия рабочих сигналов ВЛЭП (50 Гц) и радиопомех (до 10 МГц) всегда выполняется  $\omega \ll \omega_p$ , где  $\omega_p$  – резонансная частота исследуемого контура. В данном случае наведенная на межсоединении помеха определяется как:

$$U_E(t) = 0,5 \cdot U_{max} \cdot [\cos \omega \cdot t - \exp(-\alpha \cdot t) \cos(\omega_p t)], \quad (2.4)$$

$$U_{max} = E_{max} l \cdot C \cdot R_H \cdot \omega, \quad \alpha = [(R_H + R_{И}) \cdot C \omega p^2] / 2, \quad (2.5)$$

где  $\omega_p$  – резонансная частота контура и она определяется как  $\omega_p = \sqrt{1/(L \cdot C)}$ .

Для анализа воздействия магнитной составляющей электромагнитного поля ВЛЭП линии связи электронных средств рассматриваются как рамочные антенны:

$$U_H(t) = \frac{H_{max} \cdot \mu_0 \cdot S_K \cdot \omega \cdot R_{об}}{Z} [\cos(\omega t - \phi) - \cos \phi] \quad (2.6)$$

который и будет использоваться для оценки помех от магнитной составляющей ВЛЭП.

Рассмотрим результаты моделирования электромагнитных помех в линии связи БПЛА  $U_{EH}(t)$ , обусловленные излучаемым электромагнитным полем ВЛЭП (рисунок 2.3). Исходные данные: расстояние от провода ВЛЭП до исследуемого контура –  $R = 40$  м; площадь контура  $S_K = 0,1$  м<sup>2</sup>; сопротивление нагрузки –  $R_{1,2}$

= 100 Ом.

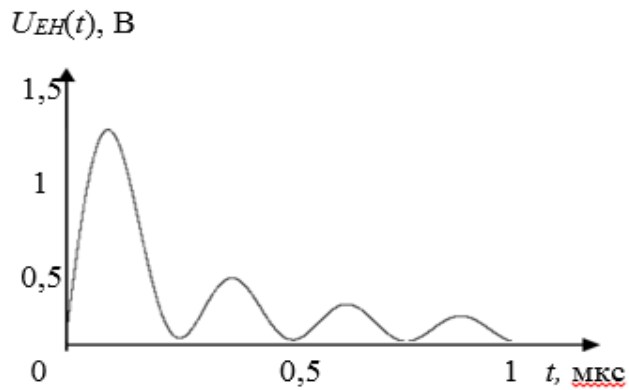


Рисунок 2.3 – Электромагнитная помеха в линии связи БПЛА

### 2.3 Моделирование функционирования элементов электронной системы БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех ВЛЭП

Полученные результаты, в виде наведенных на линиях связи БПЛА электромагнитных помех, воздействуют на информационные входы цифровых элементов (в работе рассматриваются ТТЛ элементы). Для оценки функционирования цифровых элементов электронных систем БПЛА используется схемотехнический программный комплекс ПА-9 (рисунок 2.4). Некоторые результаты воздействия электромагнитных помех от ВЛЭП на функционирование элементов представлены на рисунок 2.5.

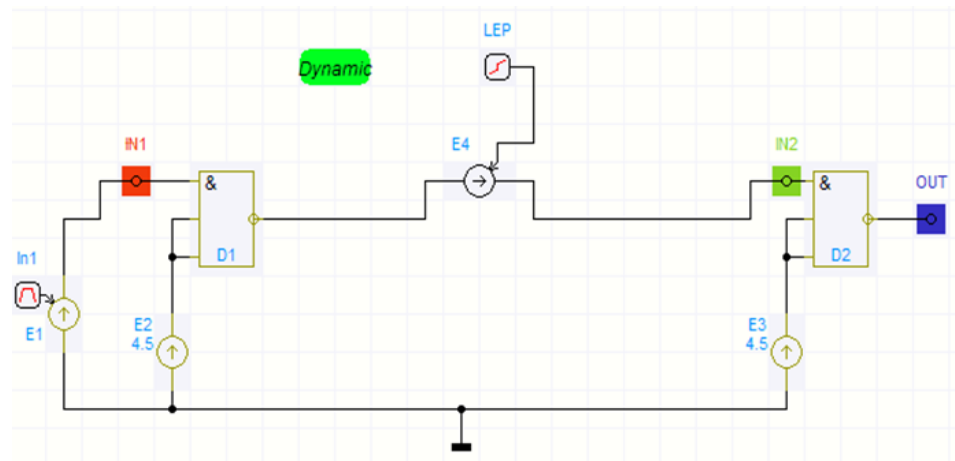


Рисунок 2.4 – Схема воздействие излучаемых помех от ЛЭП на функционирование цифровых элементов печатных плат (D1 – элемент передатчик; D2 – элемент приемник; LEP – генератор, имитирующий электромагнитную помеху)

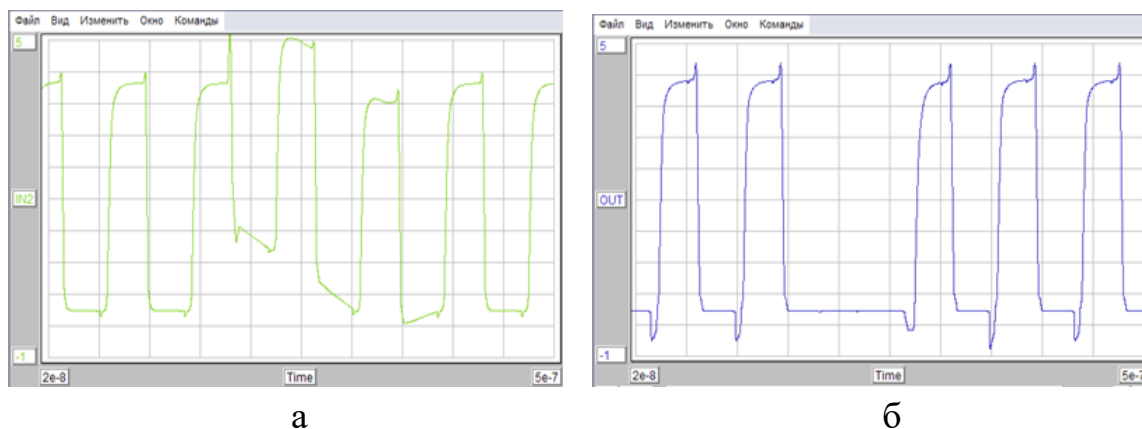


Рисунок 2.5 – Информационные сигналы при воздействии электромагнитной помехой на входе *IN2* (а) и на выходе *OUT* (б) цифрового элемента ТТЛ-типа электронной системы БПЛА

Таким образом, причиной нарушения помехоустойчивости элементов и сбоя в работе электронных систем БПЛА могут стать излучаемые электромагнитные поля ВЛЭП. Для снижения электромагнитных помех в линиях связи БПЛА при воздействии данных электромагнитных полей необходимо применить известные и новые конструкционные, схемотехнические и алгоритмические методы защиты.

### 3. Тестирование и оценка радиочастотной помехоустойчивости беспилотных летательных аппаратов для осмотра мостов

#### 3.1 Дизайн и оборудование для эксперимента

Имеется очень мало исследований о влиянии электромагнитных помех на работу беспилотных летательных аппаратов. В этом исследовании подвергаются две различные платформы беспилотных летательных аппаратов общего назначения тестированию на электромагнитную совместимость в нашем стремлении выбрать платформу из множества платформ, которая будет надежно работать, в частности, поддерживать минимальное расстояние от близлежащих поверхностей во время полета между беспилотными летательными аппаратами во время полета в воздухе закрытые и ограниченные пространства для достижения наилучших результатов. При осмотре мостов беспилотные летательные аппараты должны не только осматривать мосты сверху, но и пролетать вдоль мостов и под ними в непосредственной близости от конструкции моста, а также в закрытых и ограниченных пространствах для сбора данных. Потеря сигнала или даже его уровень во время полетов на таком близком расстоянии могут привести к повреждению беспилотного летательного аппарата.

Основное оборудование, которое использовались при тестировании радиочастотной помехоустойчивости, включает кабину беспилотника, генератор радиочастотных сигналов Agilent N9310A, анализатор сигналов Agilent CXA 9000 и испытуемые платформы беспилотных летательных аппаратов. В эксперименте были использованы два разных беспилотника общего назначения для того, чтобы выбрать тот, который может противостоять радиочастотным помехам.

В таблице 3.1 указаны частота передачи и информация о канале передачи данных каждой из двух тестируемых платформ:

- 1) DJI Mavic Air 2 (БПЛА 1)
- 2) DJI Phantom 4 Pro V2.0 (БПЛА 2)

Таблица 3.1 – Радиочастотная частота и канал передачи данных, используемые тестируемыми платформами

Платформа	Радиочастота (ГГц)	Канал передачи данных (ГГц)
БПЛА1	2,4	5,8
БПЛА2	2,4	5,8

Наземная станция/кабина пилота беспилотника 1 была оснащена жидкокристаллическим экраном для просмотра видео в режиме реального времени во время осмотра. Кроме того, на жидкокристаллическом экране отображались скорость, высота, статус GPS, состояние канала передачи данных и информация о состоянии батареи. В БПЛА 2 использовался сторонний режим просмотра от первого лица (FPV), который был установлен на смартфоне и

подключен к контроллеру для обеспечения просмотра видео в режиме реального времени. FPV также предоставляет информацию о скорости, высоте, статусе GPS, состоянии канала передачи данных и состоянии батареи. В дополнение к вышесказанному, кабина пилота отвечала за выдачу команд для дистанционного управления беспилотником. Вся вышеупомянутая информация, включая сигналы дистанционного управления, передается по радиочастотным каналам, и, таким образом, на нее могут влиять радиочастотные помехи.

Был использован генератор сигналов Agilent N9310A для создания электромагнитных помех в зоне тестирования. Он поддерживает частоты в диапазоне 9 кГц – 3 ГГц, и, таким образом, его диапазон охватывает рабочую частоту каналов связи беспилотного летательного аппарата, а также другие радиочастотные сигналы, которые могут создавать помехи каналам беспилотного летательного аппарата. Кроме того, был использован анализатор сигналов Agilent CXA 9000 для измерения средних уровней мощности радиочастотного сигнала окружающей среды, мощности передачи дистанционных команд (RC) беспилотного летательного аппарата и помех, генерируемых генератором сигналов Agilent N9310A. Он поддерживал частоты в диапазоне от 700 МГц до 3 ГГц. Генератор сигналов и анализатор были подключены к широкополосной антенне, поддерживающей их соответствующие частоты. На рисунке 3.1 показана установка, используемая для проведения тестов.



Рисунок 3.1 – Установка для эксперимента

### **3.2 Процедура тестирования и результаты эксперимента**

В качестве начального шага был просканирован диапазон частот 2 ГГц- 3 ГГц, чтобы определить мощность радиосигнала окружающей среды с помощью анализатора радиосигнала. Затем включили беспилотник и контроллер/кабину



пилота. На рисунке 3.2 показана настройка теста. Затем беспилотник был первоначально установлен на расстоянии менее 1 м от генератора сигнала.

На рисунке 3.4 показана полоса управления БПЛА 1 вместе с шумом окружающей среды. Из наблюдений видно увеличение уровня мощности на 5 дБ по сравнению с уровнем шума окружающей среды в полосе пропускания 2,395-2,481 ГГц в то время, когда была установлена связь между беспилотным летательным аппаратом и контроллером. Шум на этом графике - это просто естественный шум окружающей среды, наблюдавшийся до введения искусственно созданного шума. Аналогичные результаты были получены для БПЛА 2, поскольку они оба работали в одном и том же диапазоне частот.

Как упоминалось в разделе "Экспериментальное проектирование", тестируемые беспилотные летательные аппараты подвергались воздействию радиопомех с использованием двух методов. Первый метод включал генерацию случайного радиосигнала непрерывной волны 15 дБм в диапазоне рабочих частот беспилотного летательного аппарата. Второй метод включал частоту развертки 20 дБм в пределах диапазона рабочих частот БПЛА. Радиочастотный шум вместе с шумами окружающей среды и управляющим сигналом БПЛА 1 показаны на рисунках 3.5 и 3.6.

После введения радиочастотного шума с использованием двух методов, описанных выше, были проверены радиочастотные команды, GPS и состояние видеосвязи для БПЛА 1. Было замечено, что ни одна из функциональных возможностей БПЛА 1 не пострадала как от случайного радиочастотного шума 15 дБм, так и от размашистого шума 20 дБм. Наблюдения за экспериментом, проведенным с использованием БПЛА 1, обобщены в таблице 3.2.

Используя ту же установку, БПЛА 2 был подвергнут тем же воздействиям аналогичных уровней помех. Было заметно, что соединение между БПЛА 2 и его контроллером нарушается, если плотность мощности радиочастотного сигнала превышает  $0,00005 \text{ МВт/см}^2$ . Хотя БПЛА 2 имеет встроенный механизм переключения на другую полосу частот, когда на текущую воздействует радиочастотный шум, обычно для переключения требуется около 15 секунд. На рисунке 3.7 можно наблюдать, что при возникновении помех на частоте БПЛА 2 по умолчанию (2,444 ГГц) БПЛА автоматически переключился на другую частоту, т.е. на 2,461 ГГц. БПЛА потребовалось примерно 15 секунд, чтобы переключиться на новую частоту, и в течение этого периода вся связь была потеряна. Это связано с тем, что у БПЛА 2 задержка переключения составляет 15 секунд. Кроме того, заметно, что большая часть функциональных возможностей БПЛА 2 была нарушена даже при более низких уровнях мощности шума, которые использовались для БПЛА

Мощность радиочастотного шума выше -23 дБм серьезно повлияла на работу БПЛА 2. В большинстве случаев это влияет на сигналы GPS, видео и RC (рисунки 3.8 и 3.3). Также, когда БПЛА 2 подвергся сильному радиочастотному шуму в 10 дБм в полосе его работы, наблюдалось снижение качества видеопотока, даже несмотря на то, что радиочастотный сигнал работал должным образом. Это показано на рисунках 3.9 и 3.10.

Таблица 3.2 – Наблюдаемое воздействие радиочастотного шума на БПЛА1

Мощность радиочастотного шума	Расстояние контроллера от беспилотного летательного аппарата	Дистанционное управление	Видео	GPS
Мощность передачи 15 дБм	> 1м	Нет	Нет	Нет
Мощность передачи 15 дБм	≈ 5м	Нет	Нет	Нет
Мощность передачи 15 дБм	≈ 10м	Нет	Нет	Нет
Мощность передачи 15 дБм	≈ 20м	Нет	Нет	Нет
Мощность передачи 20 дБм (развертка)	≈ 20м	Нет	Нет	Нет

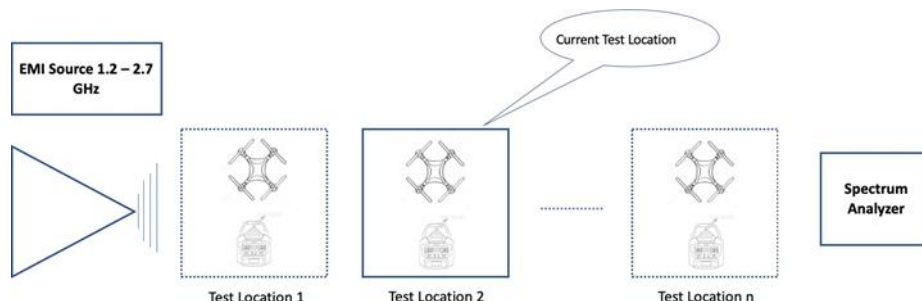


Рисунок 3.2 – Процедура проверки помехоустойчивости к радиочастотным помехам (поэтапное перемещение БПЛА и кабины пилота вместе от источника шума)

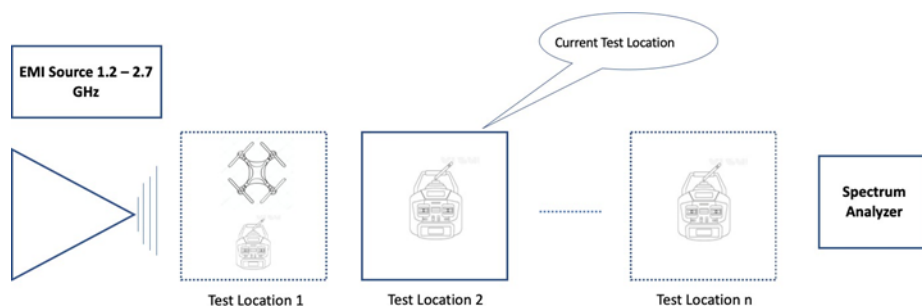


Рисунок 3.3 – Процедура проверки помехоустойчивости к радиочастотным помехам (с беспилотником, закрепленным близко к источнику шума, и поэтапным удалением кабины пилота от источника шума)

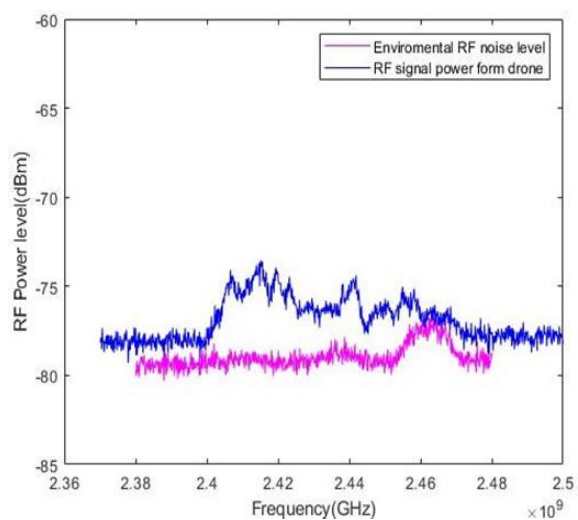


Рисунок 3.4 – Полоса управления БПЛА 1 и шум окружающей среды

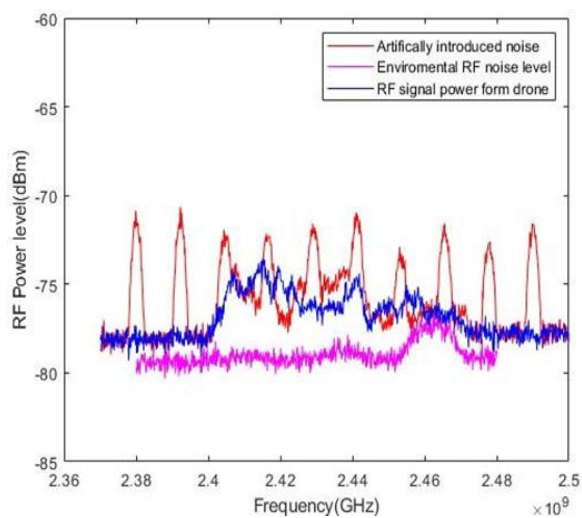


Рисунок 3.5 – Воздействие радиочастотного шума БПЛА от 1 до 5 дБм

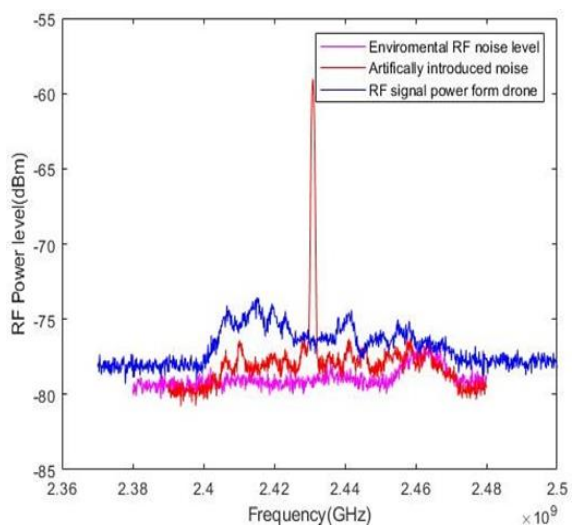


Рисунок 3.6 – Воздействие радиочастотного шума БПЛА от 1 до 20 дБм

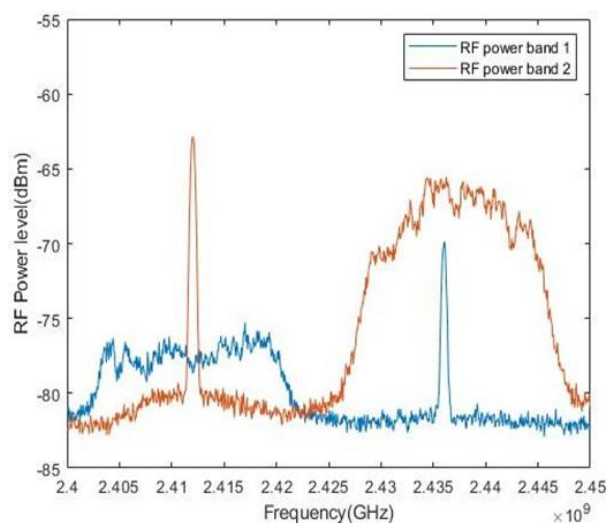


Рисунок 3.7 – Полосы управления БПЛА 2

Таблица 3.3 – Наблюдаемое воздействие радиочастотного шума на БПЛА2

Мощность радиочастотного шума	Расстояние Контроллера от беспилотного летательного аппарата	Дистанционное управление	Видео	GPS
мощность передачи -50 дБм	> 1м	Нет	Нет	Нет
мощность передачи -30 дБм	≈ 1м	Нет	Нет	Нет
мощность передачи -17 дБм	≈ 1м	Не в порядке	Не в порядке	Не в порядке
Мощность передачи 10 дБм (развертка)	≈ 6м	Нет	Не в порядке	Нет

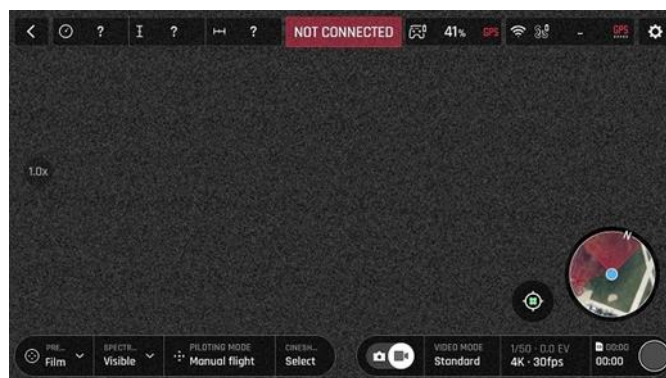


Рисунок 3.8 – Потеря RC, GPS и видео после того, как в БПЛА2 был введен радиочастотный шум > 17 дБм

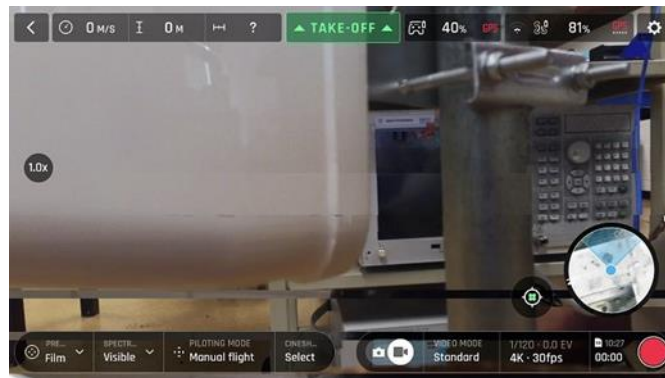


Рисунок 3.9 – Качество изображения БПЛА 2 до воздействия радиочастотного шума < -17 дБм



Рисунок 3.10 – Качество изображения БПЛА 2 после воздействия радиочастотного шума 10 дБм

### 3.3 Анализ результатов тестов

Результаты экспериментов подчеркнули важность радиочастотной помехоустойчивости беспилотных летательных аппаратов как части критериев оценки их пригодности для применения при проверке мостов. Было отмечено, что оба беспилотных летательных аппарата, использованные в этих экспериментах, соответствовали требованиям FCC по радиочастотной помехоустойчивости. Однако их поведение сильно отличалось, когда вводились радиочастотные помехи, близкие к их рабочей частоте. Беспилотный летательный аппарат 1 обрабатывал радиочастотные помехи высотой до 20 дБм без заметного воздействия на радиочастотные сигналы, GPS и видеосигналы. Это можно объяснить тем фактом, что БПЛА 1 использует резервные радиочастотные каналы, на которые можно переключаться за очень короткое время, когда канал по умолчанию отключен. Время переключения было настолько малым, что не было зафиксировано никаких сбоев в его видеопотоке и радиочастотных соединениях. Хотя БПЛА 2 использовал аналогичный механизм резервирования для радиочастотного сигнала и видео, время переключения было больше. Потребовалось около 15 секунд, чтобы

переключиться на альтернативную частоту, когда на частоту по умолчанию повлияли радиопомехи. Задержка в 15 секунд может привести к сбою БПЛА, особенно при навигации в ограниченных пространствах вокруг мостов. Кроме того, результаты показали, что реакция БПЛА на радиочастотный шум зависит от уровня мощности генерируемого радиочастотного шума. БПЛА 1 был подвергнут воздействию радиочастотных помех, достигающих 20 дБм, и по наблюдениям не было какого-либо заметного ухудшения его функциональности. А в БПЛА 2 даже воздействие радиочастотного шума в -17 дБм привело к потере GPS, видеопотока и радиочастотного соединения в БПЛА 2.

И БПЛА 1, и БПЛА 2 работают на одной частоте 2,4 ГГц и полагаются на резервные радиочастотные каналы, и беспилотник может переключиться на другой доступный канал за очень короткое время переключения, когда связь по каналу по умолчанию невозможна из-за помех от других радиочастотных источников, но задержка переключения очень важна для полетов беспилотника.

При возникновении помех беспилотный летательный аппарат должен иметь возможность переключиться на альтернативную доступную частоту, чтобы продолжать свою работу без сбоев. Для беспилотного летательного аппарата 1 задержка переключения была настолько мала, что никаких сбоев в его работе не наблюдалось, ни его реакция на команды управления, ни качество видео, ни уровень сигнала GPS не ухудшились, и беспилотный летательный аппарат смог продолжить свою работу без сбоев. В случае беспилотника 2, хотя он и работал на той же частоте, это повлияло на его работу из-за более длительной задержки переключения, составляющей около 15 секунд, пока он не смог восстановить свою работу на другой частоте. Задержка переключения ухудшала не только реакцию БПЛА на команды управления, но также ухудшалось качество видео и уровень сигнала GPS даже при шумах меньшей величины, чем те, которые использовались для БПЛА 1. Таким образом, для реализации невосприимчивости к радиочастотным помехам требуется не только наличие резервных каналов, но и также необходимо обеспечить минимальное переключение при полетах беспилотных летательных аппаратов, чтобы они могли беспрепятственно продолжать свою работу во время полетов. Это позволяет беспилотным летательным аппаратам немедленно переключаться на альтернативную доступную частоту, когда они сталкиваются с помехами от других близлежащих радиочастотных источников. В противном случае длительная задержка переключения может привести к потере связи на срок, достаточный для того, чтобы беспилотник врезался в близлежащую поверхность, которая, весьма вероятно, будет находиться в непосредственной близости от места его эксплуатации во время полетов беспилотника для проверки мостов, особенно при полетах в ограниченных пространствах. Проблема может стать особенно важной, когда эти полеты проводятся для проверки мостов, расположенных в городских районах, где с большой вероятностью будет наблюдаться присутствие других радиочастотных источников, и когда работает несколько беспилотных летательных аппаратов. Помехи могут исходить либо от другого беспилотника, пролетающего поблизости для осмотра моста, либо от

какого-либо другого прохожего беспилотника, выполняющего какую-либо другую деятельность.

Результаты подчеркивают необходимость оценки радиочастотной помехоустойчивости беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для использования в практике инспекции мостов. Также важно оценить обстановку на мосту на предмет наличия любого потенциального источника радиочастотного шума, который может повлиять на работу беспилотных летательных аппаратов. Это необходимо как для безопасности беспилотных летательных аппаратов, так и для инспекционного персонала.



## **4 Обеспечение ЭМС БПЛА в условиях мегаполиса**

### **4.1 Воздействие радиочастотного шума на беспилотные летательные аппараты условиях мегаполиса**

Воздействие радиочастотного шума на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) является значительной проблемой, особенно в условиях мегаполиса, где плотность источников электромагнитного излучения (ЭМИ) высока. Радиочастотный шум может существенно влиять на работу систем управления, передачи данных и навигации БПЛА.

Радиочастотный шум включает в себя различные виды электромагнитных помех, которые могут быть как естественного, так и искусственного происхождения:

Естественные источники:

- Космический шум (солнечное и космическое излучение);
- Атмосферные явления (молнии, грозы).

Искусственные источники:

- Радиопередатчики (телевизионные, радиостанции, мобильные сети);
- Промышленные установки (сварочные аппараты, электродвигатели);
- Транспортные средства (системы зажигания, электроника);
- Бытовая техника (микроволновые печи, роутеры Wi-Fi, Bluetooth-устройства);
- Влияние радиочастотного шума на системы БПЛА.

Системы управления и связи:

- Потеря связи между оператором и БПЛА;
- Нарушение передачи команд управления;
- Ухудшение качества передаваемого видео и данных.

Навигационные системы:

- Ошибки в определении местоположения из-за помех в GPS/ГЛОНАСС приемниках;

- Потеря сигнала от навигационных спутников.

Системы обнаружения и избегания препятствий:

- Нарушение работы радиолокационных систем и систем на основе радиочастотных датчиков.

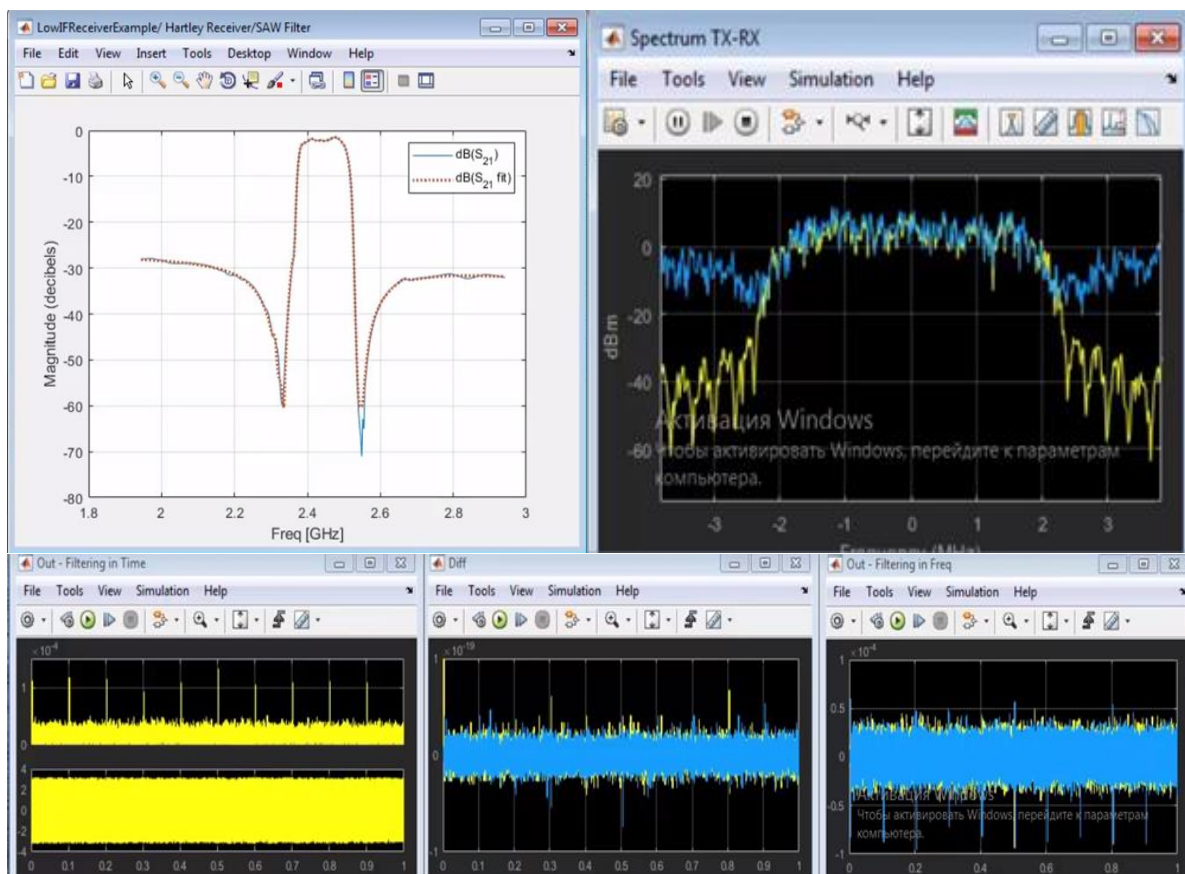


Рисунок 4.1 – Воздействие радиочастотного шума на БПЛА в MATLAB/Simulink

## 4.2 Методы минимизации воздействия радиочастотного шума

Для уменьшения влияния радиочастотного шума на БПЛА можно применять следующие методы:

Фильтрация и экранирование:

- Использование высококачественных фильтров для подавления нежелательных частот.
- Экранирование кабелей и электронных компонентов для защиты от внешних ЭМИ.

Технологии модуляции и кодирования:

- Применение схем модуляции, устойчивых к помехам, таких как OFDM.
- Использование кодирования с исправлением ошибок для повышения надежности передачи данных.

Динамическое управление частотой и мощностью:

- Адаптивное изменение частоты передачи для обхода помех.
- Регулирование мощности передатчика в зависимости от уровня шума и условий связи.

Антенные системы:

- Применение направленных антенн для уменьшения воздействия помех с боковых направлений.
- Использование многодиапазонных и многолучевых антенн для повышения надежности связи.

Протоколы связи и маршрутизация:

- Использование протоколов, обеспечивающих надежную передачу данных в условиях помех.
- Разработка методов маршрутизации данных, минимизирующих влияние шума.

Интеграция с сетями 5G. Использование возможностей сетей 5G для обеспечения высокой пропускной способности и низкой задержки передачи данных, что может повысить устойчивость к радиочастотным помехам.

Тестирование и мониторинг. Регулярное тестирование и мониторинг радиочастотной обстановки могут помочь выявить потенциальные источники помех и принять меры для их минимизации.

Лабораторные испытания. Проверка устойчивости систем БПЛА к радиочастотным помехам в контролируемых условиях.

Полевые испытания. Проведение испытаний в реальных условиях эксплуатации для оценки воздействия шума на работу БПЛА.

Мониторинг спектра. Установка систем мониторинга радиочастотного спектра для отслеживания уровня помех и динамического управления частотами.

Воздействие радиочастотного шума на БПЛА в условиях мегаполиса представляет собой серьезную проблему, требующую комплексного подхода к ее решению. Применение современных технологий фильтрации, экранирования, адаптивного управления частотой и мощностью, а также использование направленных антенн и надежных протоколов связи помогут минимизировать влияние помех и обеспечить надежную работу систем БПЛА. Регулярное тестирование, мониторинг и соблюдение стандартов ЭМС также являются ключевыми элементами в стратегии обеспечения электромагнитной совместимости радиоканалов БПЛА.

### **4.3 Расчет электромагнитной совместимости радиоканалов беспилотных летательных аппаратов в условиях мегаполиса**

Для проведения расчетов электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоканалов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях мегаполиса необходимо учитывать несколько ключевых параметров и факторов. В данном контексте основное внимание будет уделено анализу уровня помех, эффективности передачи данных и влиянию городской застройки на радиосигналы.

Основные параметры для расчетов:

- Мощность передатчика ( $P_{tx}$ );

- Частота сигнала (f);
- Усиление антенн передатчика и приемника (G<sub>tx</sub>, G<sub>rx</sub>);
- Расстояние между передатчиком и приемником (d);
- Уровень помех и шумов (N);
- Коэффициент многолучевого распространения и затухания (L<sub>м</sub>, L<sub>з</sub>);

Основные формулы для расчетов:

Уравнение свободного пространства для потерь сигнала:

$$\text{СППС(дБ)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (4.1)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м);

f – частота сигнала (Гц);

c – скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

Расчет уровня принимаемого сигнала:

$$\text{УПС(дБм)} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} - \text{СППС} - L_{\text{м}} - L_{\text{з}} \quad (4.2)$$

где P<sub>tx</sub> – мощность передатчика (дБм);

G<sub>tx</sub> и G<sub>rx</sub> – усиление антенн передатчика и приемника (дБи);

L<sub>м</sub> и L<sub>з</sub> – потери на многолучевоcть и заcтpойку (в дВ).

Исходные данные:

- Мощность передатчика (P<sub>tx</sub>): 25 дВм;
- Частота сигнала (f): 2,4 ГГц ( $2,4 \times 10^9$  Гц);
- Усиление антенн (G<sub>tx</sub>, G<sub>rx</sub>): 7 дБи каждая;
- Расстояние (d): 100 метров;
- Потери на многолучевоcть (L<sub>м</sub>): 10 дБ;
- Потери на заcтpойку (L<sub>з</sub>): 15 дБ;

Расчет СППС:

$$\text{СППС} = 20\log_{10}(100) + 20\log_{10}(2,4 \times 10^9) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{3 \times 10^8}\right) \quad (4.3)$$

$$\text{СППС} = 40 + 187,6 - 147,55 = 80,05 \text{ дБ} \quad (4.4)$$

Расчет уровня принимаемого сигнала:

$$\text{УПС} = 25 + 7 + 7 - 80,05 - 10 - 15 = -66,05 \text{ дБм} \quad (4.5)$$

Анализ результатов:

Мощность передатчика 25 дБм и усиление антенн до 7 дБи позволяет получить уровень УПС около -66,05 дБм, что выше порогового значения -70 дБм, обеспечивая стабильную и надежную связь для БПЛА в условиях мегаполиса.

Дополнительные меры:

- Оптимизация маршрутов полета. Выбор маршрутов с минимальными помехами и потерями на многолучевость.

- Регулирование использования частот. Координация с другими пользователями радиочастотного спектра для минимизации интерференции.

- Использование адаптивных технологий. Применение MIMO и когнитивного радио в БПЛА

Технологии MIMO и когнитивное радио играют важную роль в улучшении связи и надежности работы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сложных и изменяющихся условиях. Эти технологии помогают адаптироваться к изменяющейся радиочастотной среде и минимизировать влияние помех, обеспечивая более устойчивую и эффективную связь.

Технология MIMO использует несколько антенн как на передающей, так и на принимающей сторонах для улучшения производительности связи. Основные преимущества MIMO для БПЛА включают:

- Повышенная пропускная способность. Использование нескольких антенн позволяет передавать и принимать больше данных одновременно, увеличивая общую пропускную способность канала связи.

- Устойчивость к помехам. MIMO технологии могут эффективно справляться с многолучевостью (ситуациями, когда сигнал достигает приемника несколькими путями, создавая интерференцию), что улучшает качество связи в условиях помех.

- Улучшенное покрытие и дальность. Множественные антенны позволяют дрону поддерживать связь на больших расстояниях и в более сложных условиях (например, в городской застройке).

Когнитивное радио — это технология, которая позволяет устройствам автоматически адаптироваться к изменяющейся радиочастотной среде. Основные аспекты и преимущества когнитивного радио для БПЛА включают:

- Адаптивное использование спектра. Когнитивное радио способно сканировать доступные частоты и автоматически переключаться на те, которые менее загружены и имеют меньше помех, обеспечивая более надежную связь.

- Избегание помех. Когнитивное радио может обнаруживать источники помех и переключаться на альтернативные частоты, минимизируя влияние помех на связь.

- Умное управление ресурсами. Когнитивное радио может оптимизировать использование доступного спектра, улучшая эффективность передачи данных и уменьшая вероятность коллизий.

Для адаптации к изменяющимся условиям и снижения влияния помех, многие современные БПЛА используют комбинацию технологий MIMO и когнитивного радио:

- DJI OcuSync. Технология OcuSync, используемая в дронах DJI, применяет принципы MIMO для повышения надежности и дальности связи. OcuSync также использует интеллектуальное управление частотами, что похоже на когнитивное радио, чтобы автоматически выбирать наименее загруженные каналы.

- Разработка новых стандартов. Исследования в области когнитивного радио и MIMO ведутся для интеграции этих технологий в будущие стандарты беспроводной связи для дронов, что обеспечит еще большую адаптивность и устойчивость к помехам.

Технологии MIMO и когнитивного радио существенно улучшают связь и надежность БПЛА, обеспечивая адаптацию к изменяющимся условиям и минимизацию влияния помех. Эти технологии находят все более широкое применение в современных дронах, что способствует их успешному использованию в различных сценариях, от коммерческих и промышленных приложений до любительских полетов и профессиональной видеосъемки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоканалов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях мегаполиса является критически важной задачей для надежной и безопасной эксплуатации этих устройств. В условиях высокой плотности радиочастотных источников и сложной электромагнитной обстановки мегаполиса, необходимо применять комплексный подход к решению проблем ЭМС.

Основные выводы:

- Проблемы ЭМС в мегаполисе. Высокая плотность различных электронных устройств, конкурирующих за ограниченный радиочастотный спектр, приводит к значительным помехам и интерференции. Многолучевые помехи, вызванные отражениями от зданий и других объектов, создают дополнительные сложности для обеспечения надежной связи.

- Технологические решения. Для минимизации воздействия радиочастотного шума и помех необходимо использовать современные технологии модуляции и кодирования, такие как OFDM и MIMO. Применение адаптивного управления частотой и мощностью передатчиков, а также направленных антенн, способствует улучшению качества связи и снижению уровня помех.

- Фильтрация и экранирование. Важную роль играют методы фильтрации и экранирования, которые позволяют защитить радиоканалы БПЛА от внешних электромагнитных воздействий и уменьшить излучаемые помехи. Использование высококачественных фильтров и экранированных кабелей и компонентов способствует улучшению ЭМС.

- Протоколы связи и стандарты. Разработка и внедрение устойчивых к помехам протоколов связи, а также соблюдение международных и национальных стандартов по ЭМС, таких как CISPR и IEC, обеспечивают надежную передачу данных и минимизацию помех.

- Мониторинг и адаптация. Регулярный мониторинг радиочастотного спектра и динамическая адаптация систем БПЛА к изменениям электромагнитной обстановки позволяют оперативно реагировать на помехи и оптимизировать параметры связи.

Перспективы развития:

- Интеграция с сетями 5G. Использование возможностей сетей 5G для повышения пропускной способности и снижения задержек в передаче данных откроет новые возможности для обеспечения ЭМС радиоканалов БПЛА.

- Искусственный интеллект и машинное обучение. Применение ИИ и машинного обучения для динамического управления частотным спектром и предсказания помех позволит повысить эффективность систем БПЛА в условиях мегаполиса.

- Квантовые технологии. Перспективные разработки в области квантовой криптографии и квантовых коммуникаций могут обеспечить более высокий



уровень безопасности и устойчивости к электромагнитным помехам.

В заключение, успешное обеспечение электромагнитной совместимости радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса требует применения передовых технологий, регулярного мониторинга и адаптации к изменяющимся условиям, а также строгого соблюдения стандартов и нормативных требований. Современные методы и инновационные решения помогут создать устойчивые и надежные системы связи для беспилотных летательных аппаратов, способные эффективно функционировать в сложных городских условиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: Издательство МАИ. 2012. 164 с.
2. Гальперин Ю.И. Гладышев В.А. Козлов А.И. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М.: Наука. 1984.- 186с.
3. Дональд Р.Ж. Уайт Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып.2 Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. Радио. 1978. 273с.
4. Комягин С.И. Основы методологии электромагнитной стойкости беспилотных летательных аппаратов. – М.: Изд-во МИЭМ, 2007. – 158 с.
5. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии контактной сети электротранспорта // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. – № 2. – С. 283-288.
6. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников // Радиотехника и электроника. – 2018. – №1. – С. 97-102.
7. Рябов Ю.Г. Общие положения по сохранению живучести и обеспечению защиты РЭС от воздействия электромагнитного оружия и электромагнитного терроризма // Специальная техника. – 2002. – № 3. – С. 23-34.
8. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 с.
9. Piantini A., Janiszewski J.M. Scale models and their application to the study of lightning transients in power systems // Lightning Electromagnetics. Power and Energy Series. London, United Kingdom. – 2012. – pp. 719-764.
10. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. – New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 766 p.
11. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии высоковольтной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – №2. – С. 119-124.
12. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи // Электротехника. – 2018. – № 5. – С. 45-48.
13. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации // Информационные технологии. – 2013. – № 4. – С. 19-22.

14. Гизатуллин З.М. Анализ магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на внешнюю систему молниезащиты здания // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3. – С. 30-36.
15. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1/2. – С. 115-122.
16. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех при электромагнитном воздействии на макрообъекты // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 6. – С. 1.
17. Ramdani M., Sicard E., Dhia S. Towards and EMC roadmap for integrated circuits // Proceedings of the 19th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, 2008. – pp. 8-11.
18. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
19. Kohlberg I., Carter R.J. Some theoretical considerations regarding the susceptibility of information systems to unwanted electromagnetic signals // Proceedings of the 14 th International Zurich Symp. on EMC. Zurich, 2001. – pp. 41-46.
20. Здухов Л.Н., Парфёнов Ю.В., Тарасов О.А., Чепелев В.М. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2. – С. 22-34.
21. Нуриев М.Г. Физическое моделирование электромагнитных помех для прогнозирования помехоустойчивости бортовой вычислительной техники БПЛА // Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – № 1. – С. 41-51.
22. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С., Под ред. Атабекова Г.И. Теоретические основы электротехники: учебник для ВУЗов. В 3-х ч. Ч. 2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле – 4-е изд., переработанное. М.: Энергия, 1979. 432 с.
23. Аверин С.В., Кириллов В.Ю., Машуков Е.В., Резников С.Б., Шевцов Д.А. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых кабелей беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – № 3. – С. 113-117.
24. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабельных летательных аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 2. – С. 3-8.

**ОТЗЫВ**

**НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломную работу

Ниязов Равиль Баратович

Специальность 6В06201 – Телекоммуникация

«Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях  
мегаполиса»

Дипломная работа построена следующим образом: введение, анализ ЭМС, для БПЛА в условиях мегаполиса. Электромагнитные помехи в конструкции летательного аппарата. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, выводы, список литературы.

В условиях мегаполиса использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сталкивается с рядом вызовов, связанных с электромагнитной совместимостью (ЭМС) их радиоканалов. Городская среда насыщена различными источниками электромагнитных помех, включая мобильные сети, Wi-Fi, телевизионные и радиопередатчики, а также другие устройства, работающие в радиочастотном диапазоне. Эти факторы могут негативно влиять на качество связи и управление БПЛА, что повышает риск потери управления и возникновения аварийных ситуаций.

В рамках дипломной работы, рассматриваются основные аспекты обеспечения ЭМС радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса. Проанализированы источники помех, их воздействие на радиоканалы, а также предложены методы и технологии для повышения надежности и устойчивости связи.

Основные выводы содержатся в заключении.

Дипломная работа Ниязова Равиля Баратовича может быть рекомендована к защите с присвоением ему академической степени бакалавра по образовательной программе 6В06201 – «Телекоммуникация» и оценивается на оценку 90 (отлично).

Научный руководитель,  
ассоц-профессор, к.т.н.



Дараев А.М.

« 23 » \_\_\_\_\_ 2024 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**РЕЦЕНЗИЯ**

На дипломную работу

Ниязов Равиль Баратович

Специальность 6В06201 – Телекоммуникация

На тему: «Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса»

Выполнено:

- а) теоретическая часть на листах
- б) практическая часть на листах

**ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ**

1. Не указаны на каком ПО получены результаты в п.2.3
2. В 3 главе производится почему-то сравнение БПЛА-1 и БПЛА-2.
3. Из материалов 4 главы не просматривается вывод о технологии ММО, и когнитивного радио, которые помогут динамически адаптироваться к изменяющимся условиям и снизить влияние помех

**Оценка работы**

Студент показал хорошее знание теоретического материала, работа выполнена согласно задания ДП, соблюдены все стандарты университета по написанию дипломных работ.

Считаю, что дипломная работа выполнена на оценку 80 (хорошо), а дипломник Ниязов Равиль, заслуживает присвоения академической степени бакалавра телекоммуникации 6В06201 – Телекоммуникация.

Рецензент  
к.т.н., профессор,  
Алматинского университета  
энергетики и связи имени Г.Даукунова



Байкенов А. С.

23 мая 2024 г.

Қолданбалы растаймын  
Подпись заверяю  
Қызметі Шамеева З.А  
аты-жөні 3.10  
20

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Ниязов Равиль Баратович**

**Тақырыбы: Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса**

**Жетекшісі: Абдумажит Дараев**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.6**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0**

**Дәйексөз (35): 0.4**

**Әріптерді ауыстыру: 19**

**Аралықтар: 84**

**Шағын кеңістіктер: 56**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

**2024-06-01**

*Күні*

*Кафедра меңгерушісі*





## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Ниязов Равиль Баратович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса

**Научный руководитель:** Абдумажит Дараев

**Коэффициент Подобия 1:** 0.6

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 56

**Знаки из здругих алфавитов:** 19

**Интервалы:** 84

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

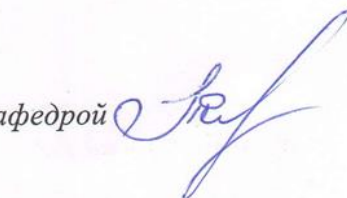
Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2024-06-01

Дата

Заведующий кафедрой



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Ниязов Равиль Баратович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Электромагнитная совместимость радиоканалов БПЛА в условиях мегаполиса

**Научный руководитель:** Абдумажит Дараев

**Коэффициент Подобия 1:** 0.6

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 56

**Знаки из здругих алфавитов:** 19

**Интервалы:** 84

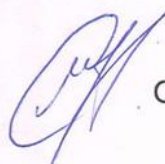
**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

2024-06-01

*Дата*



Сүңғат Марксұлы

*проверяющий эксперт*