

А.М. Дараев¹, Д. Ильяс¹, Е. Таштай¹, Г.Б. Кашаганова²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Almaty Technological University, Алматы, Казахстан

E-mail: i.daulet.m@gmail.com

ТЕСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РАДИОЧАСТОТНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОСМОТРА МОСТОВ

Аннотация. 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. В статье рассмотрены проблемы ЭМС при высокой плотности различных электронных устройств, конкурирующих за ограниченный радиочастотный спектр, которая приводит к значительным помехам и интерференции. Для минимизации воздействия радиочастотного шума и помех рассмотрены современные технологии модуляции и кодирования, такие как OFDM и MIMO. Показано применение адаптивного управления частотой и мощностью передатчиков, а также направленных антенн, способствует улучшению качества связи и снижению уровня помех.

Ключевые слова. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), электромагнитная совместимость (ЭМС), надежность, помеха, частотный диапазон.

Введение.

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.

Материалы и методы.

Для проведения эксперимента 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 1 показана установка, используемая для проведения тестов.



Рисунок 1- Установка для эксперимента

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 1 указаны частота передачи и информация о канале передачи данных каждой из двух тестируемых платформ.

Таблица 1- Радиочастотная частота и канал передачи данных, используемые тестируемыми платформами

Платформа	Радиочастота (ГГц)	Канал передачи данных (ГГц)
БПЛА 1	2.4	5.8
БПЛА 2	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.

Результаты и обсуждения.

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 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 0,00005МВт/см². 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 2 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

1. Мощность радиочастотного шума выше -23 дБм серьезно повлияла на работу БПЛА 2. В большинстве случаев это влияет на сигналы GPS, видео и RC (рисунки 3-10). 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 4 и 5.

Таблица 2- Наблюдаемое воздействие радиочастотного шума на БПЛА 1

Мощность радиочастотного шума	Расстояние контроллера беспилотного летательного аппарата от	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

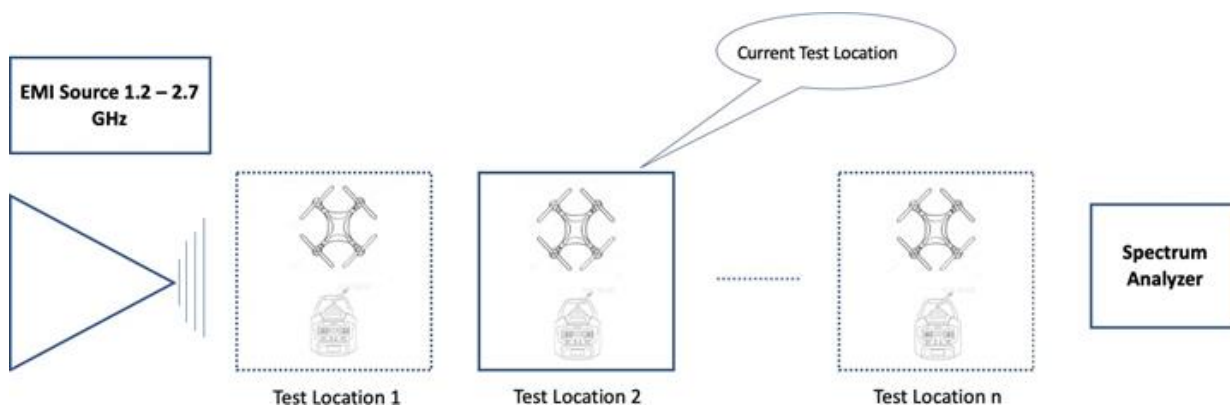


Рисунок 2- Процедура проверки помехоустойчивости к радиочастотным помехам (поэтапное перемещение БПЛА и кабины пилота вместе от источника шума)

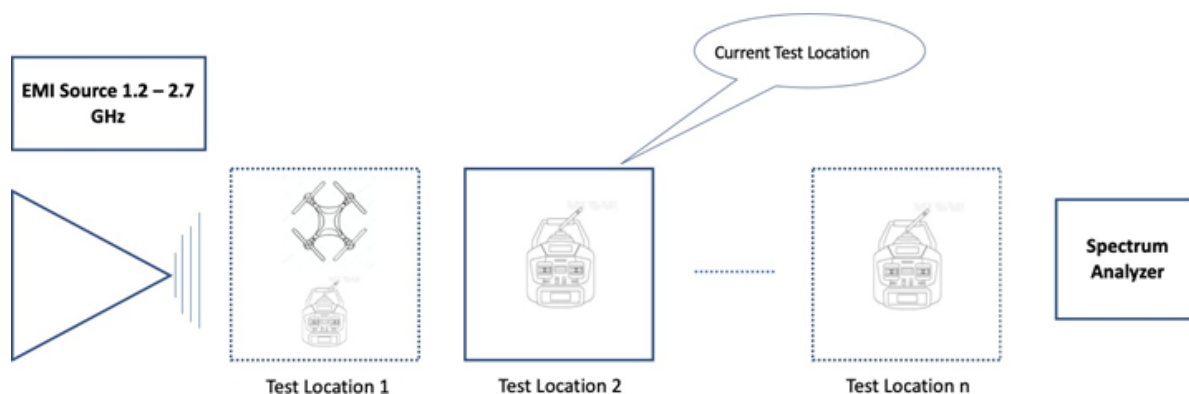


Рисунок 3- Процедура проверки помехоустойчивости к радиочастотным помехам (с беспилотником, закрепленным близко к источнику шума, и поэтапным удалением кабины пилота от источника шума)

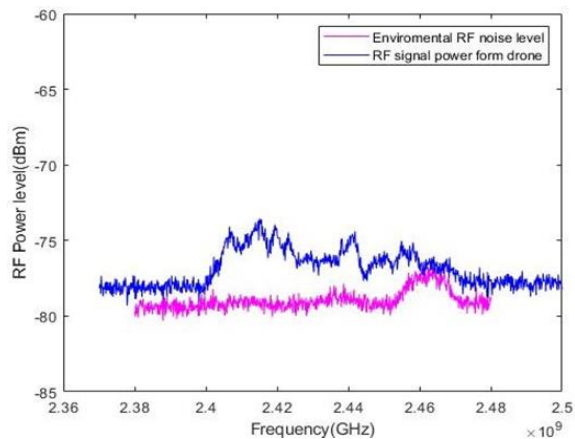


Рисунок 4-Полоса управления БПЛА 1 и шум окружающей среды

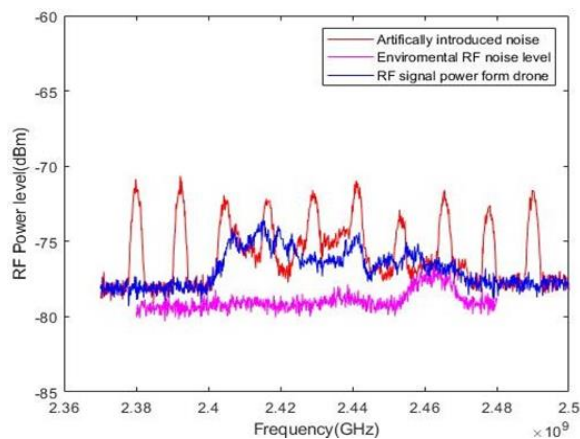


Рисунок 5 - Воздействие радиочастотного шума БПЛА от 1 до 5 дБм

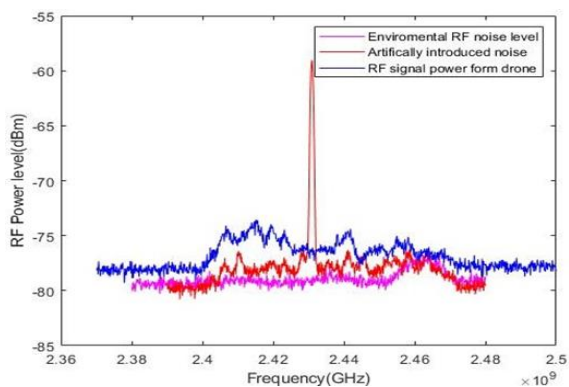


Рисунок 6- Воздействие радиочастотного шума

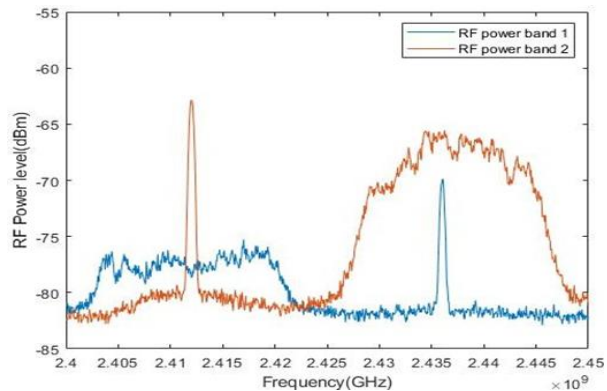


Рисунок 7 - Полосы управления БПЛА 2 БПЛА от 1 до 20 дБм

Таблица 3- Наблюдаемое воздействие радиочастотного шума на БПЛА 2

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

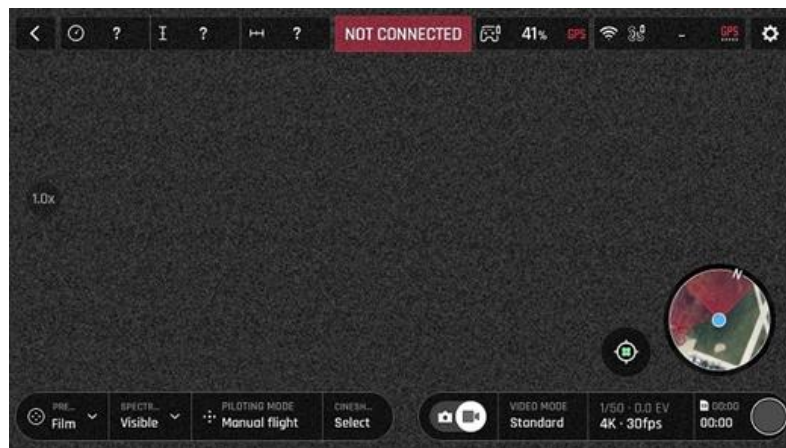


Рисунок 8- Потеря RC, GPS и видео после того, как в БПЛА2 был введен радиочастотный шум > 17 дБм

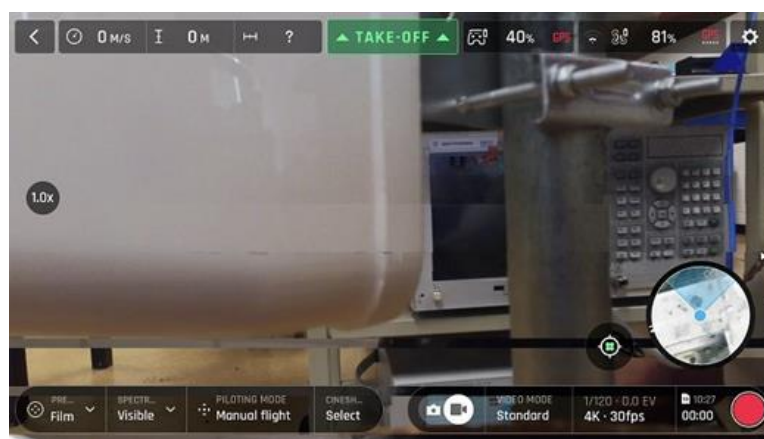


Рисунок 9 - Качество изображения БПЛА 2 до воздействия радиочастотного шума < -17 дБм.



Рисунок 10- Качество изображения БПЛА 2 после воздействия радиочастотного шума 10 дБм

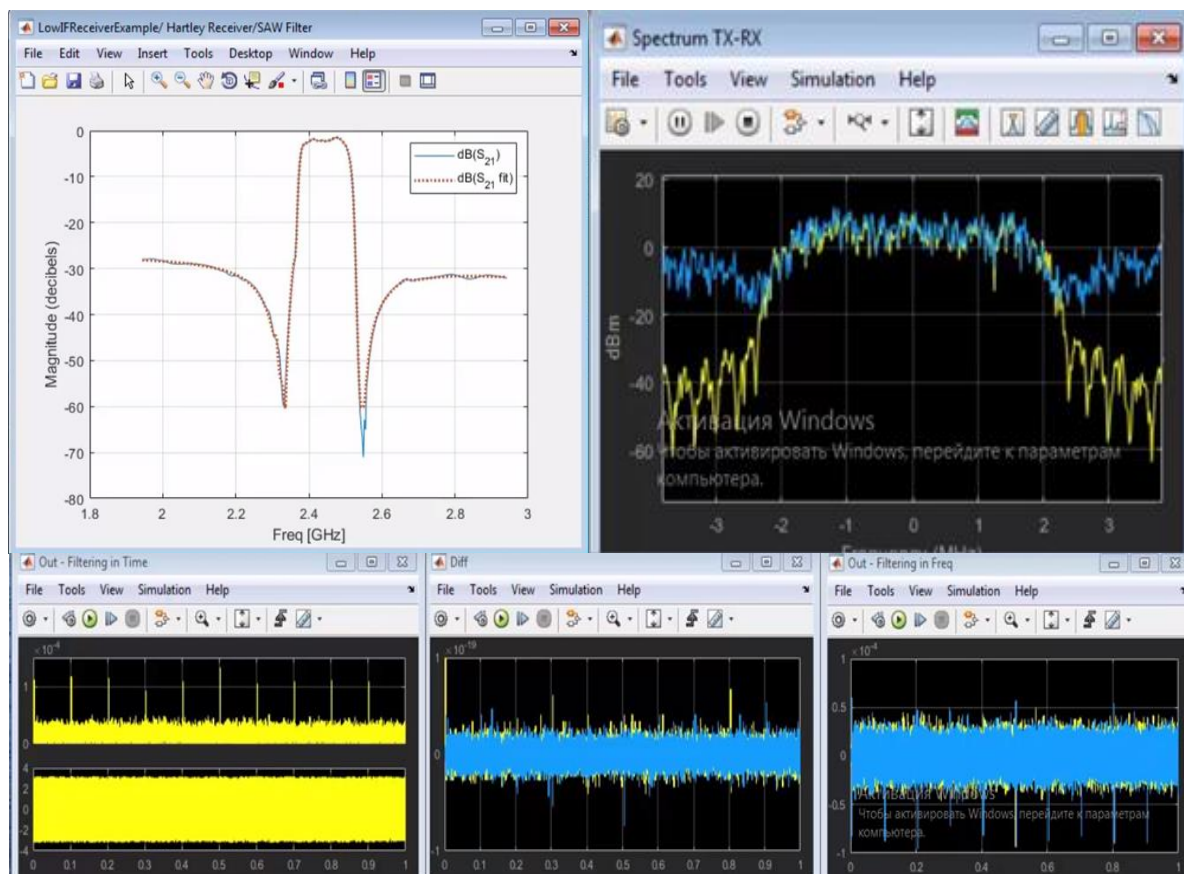


Рисунок 11 - Воздействие радиочастотного шума на БПЛА в MATLAB/Simulink

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.

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 ММО. Применение адаптивного управления частотой и мощностью передатчиков, а также направленных антенн, способствует улучшению качества связи и снижению уровня помех.

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.

ЛИТЕРАТУРА

- [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.- 186 с.
- [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: Pren-tice 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.

REFERENCES*

[1] Kirillov V.Ju. Jelektromagnitnaja sovmestimost' letatel'nyh apparatov. - M.: Izdatel'stvo MAI. 2012. - 164 s.

[2] Gal'perin Ju.I. Gladyshev V.A.Kozlov A.I. Jelektromagnitnaja sovmestimost' nauchnogo kosmicheskogo kompleksa ARKAD-3. - M.: Nauka. 1984.- 186 s.

[3] Donal'd R.Zh.Uajt Jelektromagnitnaja sovmestimost' radiojelektronnyh sredstv i neprednamerennye pomehi. Vyp.2 Vnutrisistemnye pomehi i metody ih umen'shenija. - M.: Sov. Radio. 1978. - 273s.

- [4] Komjagin S.I. Osnovy metodologii jelektromagnitnoj stojkosti bespilotnyh letatel'nyh apparatov. – M.: Izd-vo MIJeM, 2007. – 158 s.
- [5] Nuriev M.G., Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh pomех v bespilotnom letatel'nom apparate pri vozdejstvii kontaktnoj seti jelektrotransporta//Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. – 2018. – № 2. – S. 283-288.
- [6] Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie pomехoustojchivosti jelektronnyh sredstv pri jelektromagnitnom vozdejstvii industrial'nyh makroistochnikov // Radiotekhnika i jelektronika. – 2018. – №1. – S. 97-102.
- [7] Rjabov Ju.G. Obshhie polozhenija po sohraneniju zhivuchesti i obespecheniju zashhity RJeS ot vozdejstvija jelektromagnitnogo oruzhija i jelektromagnitnogo terrorizma//Special'naja tehnika. – 2002. – № 3. – S. 23-34.
- [8] Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 s.
- [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: Pren-tice Hall, 2003. – 766 p.
- [11] Nuriev M.G., Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh pomех v bespilotnom letatel'nom apparate pri vozdejstvii vysokovol'tnoj linii jelektroperedachi//Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. – 2017. – № 2. – S. 119-124.
- [12] Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh pomех v jelektronnyh sredstvah pri vozdejstvii jelektromagnitnyh polej vysokovol'tnyh linij jelektroperedachi // Jelektrotehnika. – 2018. – № 5. – S. 45-48.
- [13] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Modelirovanie jelektromagnitnoj obstanovki na osnove teorii masshtabnogo jeksperimenta dlja zadach jelektromagnitnoj sovmestivosti i zashhity informacii//Informacionnye tehnologii. – 2013. – № 4. – S. 19-22.
- [14] Gizatullin Z.M. Analiz magnitnyh polej vnutri zdanija pri vozdejstvii razrjada molnii na vneshnjuju sistemu molniezashhity zdanija//Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. – 2010. – № 3. – S. 30-36.
- [15] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Nuriev M.G. Matematicheskie modeli dlja fizicheskogo modelirovanija zadach jelektromagnitnoj sovmestivosti//Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. – 2015. –№ 1/2. – S. 115-122.
- [16] Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh pomех pri jelektromagnitnom vozdejstvii na makroob#ekty//Zhurnal radiojelektroniki. – 2015. – № 6. – S. 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] Kechiev L.N. Proektirovanie pechatnyh plat dlja cifrovoj bystrodejstvujushhej apparatury. - M.: OOO «Gruppa IDT», 2007. – 616 s.
- [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] Zduhov L.N., Parfjonov Ju.V., Tarasov O.A., Chepelev V.M. Tri vozmozhnyh mehanizma vozniknovenija otkazov jelektronnyh ustrojstv v rezul'tate jelektromagnitnogo vozdejstvija//Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. – 2018. – № 2. – S. 22-34.

[21] Nuriev M.G. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh pomех dlja prognozirovaniya pomехoustojchivosti bortovoj vychislitel'noj tehnikы BPLA//Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestimosti. – 2019. –№ 1. – S. 41-51.

[22] Atabekov G.I., Kupaljan S.D., Timofeev A.B., Huhrikov S.S. Pod red. Atabekova G.I. Teoreticheskie osnovы jelektrotehnikы: uchebnik dlja VUZov. V 3-h ch. Ch. 2 i 3. Nelinejnye jelektricheskie cepi. Jelektromagnitnoe pole – 4-e izd., pererabotannoe. - M.: Jenergija, 1979. - 432 s.

[23] Averin S.V., Kirillov V.Ju., Mashukov E.V., Reznikov S.B., Shevcov D.A. Obespechenie jelektromagnitnoj sovmestimosti bortovyh kabelej bescopilotnyh letatel'nyh apparatov//Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. – 2017. – № 3. – S. 113-117.

[24] Kirillov V.Ju., Klykov A.V., Nguen V.H., Tomilin M.M. Issledovanie soprotivlenija svjazi i jeffektivnosti jekranirovaniya bortovyh kabel'nyh letatel'nyh apparatov//Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestimosti. – 2014. – № 2. – S. 3-8.

Даулет Ильяс, магистрант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, i.daulet.m@gmail.com

Абдумежит Дараев, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, a.darayev@satbayev.university

Ерлан Таштай, т.ғ.к., доцент, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, y.tashtay@satbayev.university

Гульжан Кашаганова, PhD, Almaty Technological University, Алматы, Қазақстан, guljan_k70@mail.ru

КӨПРЛЕРДІ ТЕКСЕРУ ҮШІН ПИЛОТСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ РАДИОЖИЛІК КЕДЕРГІСІНЕ ТЕСТІЛЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Андатпа. Мегаполис жағдайында ұшқышсыз ұшу аппараттарының (ҰҰА) радиоарналарының электромагниттік үйлесімділігін (ЭМС) қамтамасыз ету осы құрылғыларды сенімді және қауіпсіз пайдалану үшін маңызды міндет болып табылады. Радиожиілік көздерінің жоғары тығыздығы және мегаполистің күрделі электромагниттік жағдайы жағдайында ЭМС проблемаларын шешуге кешенді тәсіл қолдану қажет. Мақалада шектеулі радиожиілік спектрі үшін бәсекелес әр түрлі электронды құрылғылардың жоғары тығыздығындағы ЭМС проблемалары қарастырылады, бұл айтарлықтай кедергі мен интерференцияға әкеледі. Радиожиілік шуы мен кедергілердің әсерін азайту үшін OFDM және MIMO сияқты заманауи модуляция және кодтау технологиялары қарастырылады. Таратқыштардың, сондай-ақ бағытталған антенналардың адаптивті жиілігі мен қуатын басқаруды қолдану байланыс сапасын жақсартуға және кедергі деңгейін төмендетуге ықпал етеді.

Түйінді сөздер. Ұшқышсыз ұшу аппараттары (ұшқышсыз ұшу аппараттары), электромагниттік үйлесімділік (ЭМС), сенімділік, кедергі, жиілік диапазоны.

Daulet Ilyas, master's student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, i.daulet.m@gmail.com

Abdumezhit Darayev, candidate of technical sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, a.darayev@satbayev.university

Yerlan Tashtay, candidate of technical sciences, docent, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, y.tashtay@satbayev.university

Gulzhan Kashaganova, PhD, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, guljan_k70@mail.ru

TESTING AND EVALUATION OF RADIO FREQUENCY NOISE IMMUNITY OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR BRIDGE INSPECTION

Abstract. Ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of radio channels of unmanned aerial vehicles (UAVs) in a megalopolis is a critically important task for the reliable and safe operation of these devices. In conditions of high density of radio frequency sources and the complex electromagnetic environment of a megalopolis, it is necessary to apply an integrated approach to solving EMC problems. The article discusses the problems of EMC with a high density of various electronic devices competing for a limited radio frequency spectrum, which leads to significant interference and interference. To minimize the effects of RF noise and interference, modern modulation and coding technologies such as OFDM and MIMO are considered. The use of adaptive frequency and power control of transmitters, as well as directional antennas, is shown to improve communication quality and reduce interference.

Keywords. Unmanned aerial vehicles (UAVs), electromagnetic compatibility (EMC), reliability, interference, frequency range.

Редакцияға түсті / Поступила в редакцию / Received 21.07.2024

Жариялауға қабылданды / Принята к публикации / Accepted 15.01.2025