Институту магистратуры СПбГУТ 5 лет

УДК 621.396.2

Анализ использования и развития беспроводных технологий связи с беспилотными объектами

Симонина О. А.✉, Чернышов А. Г.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: *В современном мире активно развиваются беспилотные объекты, а, следовательно, актуализируется задача управления такими аппаратами. При этом беспилотные объекты могут передвигаться с разной скоростью и в различной среде. В настоящее время их разделяют на воздушные, наземные, подводные и надводные. Так как среда распространения сильно влияет на радиоканал, необходимо разработать методику выбора метода синтеза радиоканала для беспилотного объекта.* ***Целью работы*** *является анализ основных тенденций связи с беспилотными объектами различного назначения и формулировка задач исследования и разработки технологий связи с ними.* ***Используемые методы:*** *анализ научных источников.* ***Новизна:*** *показано единое пространство требований к системам связи с беспилотными объектами с точки зрения верхних уровней, несмотря на различную среду распространения, скорость движения, особенности применения и технической реализации.* ***Результат:*** *показано, что выбор технологии обусловлен требованиями к услугам, средой распространения и скоростью подвижного объекта. Сделан акцент на условиях применения беспилотных систем и влиянии сценария использования аппаратов на архитектуру сети радиосвязи. Проведён обзор технологий беспроводного доступа и сделаны рекомендации по выбору технологии для организации радиоканала с беспилотными аппаратами различного назначения.* ***Теоретическая/практическая значимость:*** *обозначены задачи исследования и разработки в целях совершенствования этих технологий, что поможет сузить круг поисковых задач при разработке и изучении новых радиосистем для связи с беспилотными объектами.*

Ключевые слова: *беспилотные объекты, радиосвязь, среда распространения, факторы влияния на качество радиоканала*

Актуальность

Актуальность применения беспилотных объектов особенно возросла в последние годы. Прежде всего это обусловлено возможностью как экономии человеческих ресурсов, так и бережного обращения с персоналом в небезопасных локациях. Использование таких аппаратов существенно расширяет возможности проведения работ там, где присутствие человека затруднено или даже невозможно. Сейчас различают несколько направлений в развитии беспилотных объектов: воздушные – самолётного и вертолётного типов, наземные, надводные, подводные. Для каждого из этих типов беспилотных объектов нужны средства связи между самим аппаратом и пультом управления, которые будут различаться в зависимости от дальности связи и среды распространения. Принципиально степень свободы любого аппарата определяется его возможностями работать в режиме робота, т. е. по

Библиографическая ссылка на статью:
Симонина О. А., Чернышов А. Г. Анализ использования и развития беспроводных технологий связи с беспилотными объектами // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. С. 4. EDN: RZSDQB

Reference for citation:
Simonina O., Chernyshov A. Analysis of the Use And Development of Wireless Communication Technologies with Unmanned Objects // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 4. EDN: RZSDQB

© Симонина О. А., Чернышов А. Г., 2024

EDN: RZSDQB
URL: https://vestnik-sut.ru/2024-1/C03.pdf

программе, и/или в режиме аватара, с непосредственным управлением оператором в режиме реального времени. Современные беспилотные аппараты поддерживают или режим аватара, или совмещают оба этих режима, что актуально в случае потери управления. Таким образом, для организации связи необходимо обеспечить радиоканал управления для дуплексной передачи данных (управляющих команд и ответов для них, а также телеметрических данных о состоянии объекта) и симплексный канал передачи видео для контроля производимых объектом действий. Таким образом, независимо от типа беспилотного объекта, требования к системе связи на верхних уровнях будут идентичны, так как обусловлены возможностями оператора по контролю и управлению аппаратом.

Требования к качеству обслуживания трафика беспилотных объектов

Требования к каналам радиосвязи задают требования к технологиям нижних уровней и архитектурным решениям. Требования к системам радиосвязи для беспилотных объектов разделяются на два типа: передача видеоинформации и передача сигналов управления. Прежде всего отметим, что это принципиально разные типы трафика, которые задают разные требования к качеству обслуживания.

Рассмотрим трафик управления и определим целевые показатели, которые позволят в дальнейшем определить требования к радиоканалу по пропускной способности и битовым ошибкам (BER, *аббр. от англ.* Bit Error Rate). Согласно [1], требования к данному каналу довольно жёсткие: по задержке – до 100 мс, по потерям – до 10^{-3}. Однако это смягчается требованиями по пропускной способности: в переделах 200–250 кбит/с, так как объем управляющих команд и телеметрических данных составляет десятки килобит. Такие требования позволяют организовать канал на довольно большие расстояния.

Трафик видео, напротив, имеет более мягкие требования к задержкам, джиттеру задержки и потерям (таблица 1), но в то же время ещё и требует высокой пропускной способности. По разным данным видеокодеки требуют до 1 Мбит/с [2]; при этом не учитываются особенности беспроводного канала. Трафик потоковых видеоданных формирует так называемый транспортный поток, задача которого – передать видео, являющееся синхронным событием на выходе кодека, по асинхронной пакетной сети. В одном пакете могут быть фрагменты разных кадров, а также присутствовать информация для организации синхронизации на стороне получателя. Именно поэтому потери в радиоканале могут приводить к совершенно разным последствиям для воспроизводимого видео: если потерян пакет с так называемым разностным кадром, несущим в себе только информацию об изменениях по отношению к опорному, то пользователь может даже не заметить ухудшения качества. При этом потеря пакета с опорным кадром или заголовком синхронизации приводит к существенным сбоям. Таким образом, из-за непредсказуемости видеопотока, полностью зависящего от кодируемого контента, важно обеспечивать наилучшее качество передачи, не хуже, чем для канала управления.

Таблица 1. Требования к трафику движущихся объектов [1]

Параметры	Трафик управления	Трафик видеоданных
Класс трафика согласно Рекомендации МСЭ Y.1541	0	1
Задержка пакетов, IPTD, мс	100	400
Джиттер задержки, IPDV, мс	50	50
Коэффициент потерянных пакетов, IPLR	1×10^{-3}	1×10^{-3}
Коэффициент пакетов с ошибками, IPER	1×10^{-4}	1×10^{-4}
Коэффициент переупорядочивания пакетов, IPRR	–	–

Следовательно, именно на нижних уровнях необходимо решить задачу обеспечения качественной передачи данных в обоих каналах. На рисунке 1 приведён пример реализации связи между беспилотным летающим аппаратом (БПЛА) вертолётного типа (коптер) и пультом управления (ПУ) с возможностью дальнейшей передачи в центр обработки данных (ЦОД). Данная схема будет актуальна и для других типов беспилотных объектов.

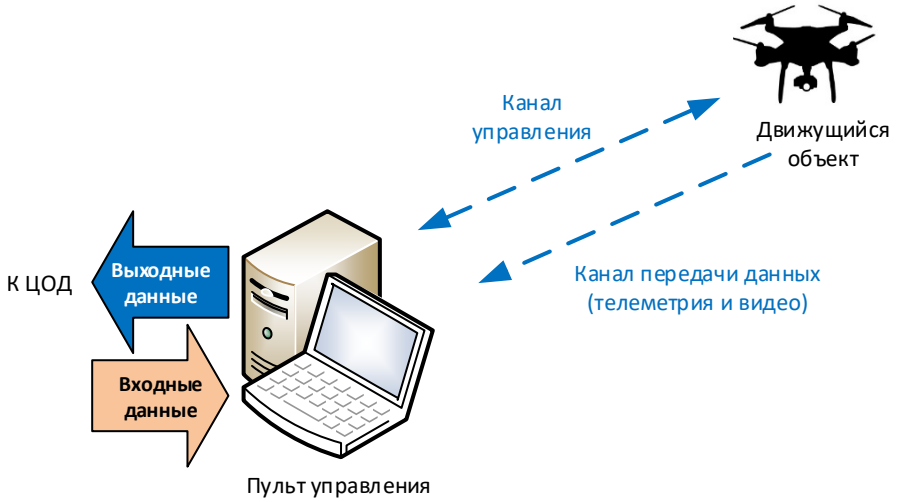

Рис. 1. Концепция передачи трафика между движущимся объектом и пультом управления [3]

Таким образом, для перспективной технологии связи с беспилотным объектом важным параметром является возможность обеспечения на верхних уровнях заданных показателей качества. В силу разной природы трафика возможна реализация двух каналов, на различных частотах и с различными техническими характеристиками. Особенно это важно при разработке системы связи на расстояния от 1 км.

Влияние среды распространения на выбор технологии связи с беспилотным объектом

Как уже отмечалось выше, беспилотные объекты могут использоваться в разной среде – воздух, вода, поверхность земли и поверхность воды. В силу различной природы распространения радиоволн необходимо учитывать возможные применения объекта. Более того, важна скорость беспилотного объекта. Именно эти два фактора зададут архитектуру, для которой можно будет выбирать подходящую технологию.

Рассмотрим воздух в качестве среды распространения. Наименее сложный вариант – связь с БПЛА. Радиоканал в этом случае относится к прямой видимости, и его дальность ограничена техническими характеристиками – частотой, модуляционно-кодирующей схемой, требованиями к частоте BER, мощностью передатчика и т. д. Для таких систем можно добиться довольно неплохих результатов по дальности – до 100 км [4, 5]. При этом для аппаратов ближнего и среднего радиуса действия такая дальность даже избыточна, так как обычно они используются на расстояниях до 5 и 20 км, соответственно. Также БПЛА можно применять в качестве ретрансляторов, в том числе спутникового сигнала [6], что делает выбор технологии связи с наземными объектами более сложной в силу необходимости учитывать электромагнитную совместимость с системами космической радиосвязи на борту аппарата.

Для подводных беспилотных аппаратов требуются особые каналы связи, называемые гидроакустическими. Такие каналы работают на частотах от 9 до 200 кГц, обеспечивают связь на расстояние до 1 км со скоростью передачи данных до 50 кбит/с. На сегодня этот физический канал позволяет либо организовать низкоскоростной обмен информацией на расстояния до десятков и даже сотен километров, либо передавать данные на сравнительно небольшие дистанции (в пределах 1 км) со скоростью до 70 кбит/с [7]. При этом важно, что характеристики гидроакустического канала сильно зависят от солёности и температуры воды, а также степени её загрязнения. Кроме того, эффект Доплера и значительная рефракция сигнала усложняют разработку каналов большей дальности и с большей пропускной способностью. В настоящее время ведутся активные исследования в области разработки оборудования для гидроакустической связи. Согласно анализу, приведённому в [7], перспективные системы подводной связи позволят обеспечить скорость передачи данных до 1 Гбит/с на расстояние 80 м в океанической воде для систем на основе лазерных диодов.

В случае использования надводных беспилотных объектов, казалось бы, проблем в организации радиоканала должно быть меньше, так как дальность связи около воды обычно больше. Однако сложность заключается в том, что радиоканалы очень чувствительны к воздействию водных паров, тумана и дождя, причём с повышением частоты их влияние растёт [8]. В этом случае необходим компромисс между понижением частоты в целях уменьшения затухания и возможностью обеспечить дальность и пропускную способность, достаточную для управления подобными аппаратами. В настоящее время управление такими системами гражданского назначения чаще всего производится по сети сотовой мобильной связи и других с использованием береговой инфраструктуры [9].

Наземные беспилотные аппараты можно обозначить как очень интересные с точки зрения развития систем радиосвязи. Прежде всего, это существование двух совершенно разных сценариев использования таких систем – в условиях городской среды и хорошего покрытия и в условиях его отсутствия. Также очень много зависит от высоты подвеса антенн, поэтому некоторые модели не подходят для расчёта радиоканалов для небольших роботехнических комплексов, а земная волна может оказывать существенное влияние на характеристики канала, что делает необходимым подвес антенны на высоту от 1,5 м. При этом существует довольно много моделей распространения радиосигнала, как учитывающих возможность огибания препятствий, так и не учитывающих. Если мы рассматриваем городскую среду, то в этом случае большое количество моделей (таблица 2) иногда сильно затрудняет возможности предсказания параметров связи в заданной точке, так как для различных сценариев подходят разные модели, дающие зачастую сильно отличающиеся оценки. Модель распространения должна оптимизировать и модифицировать существующую методологию в соответствии с изменением окружающей среды вокруг объекта [10], поэтому выбор модели распространения требует отдельного анализа. Возможно, использование методов искусственного интеллекта поможет выявить скрытые закономерности и действительно оптимизировать существующие модели для оценки качества радиоканала наземных беспилотных объектов.

Таблица 2. Модели распространения сигнала

Модели	Критерии		
	Частотный диапазон, МГц	Расстояние между точкой доступа и мобильным объектом, км	Высота подвеса антенны точки доступа при высоте повеса антенны мобильного объекта до 10 м, м
Окамуры	150–2000	1–100	30
Окамуры-Хата	150–1500	1–20	30
ECC-33	150–1500	1–100	30
SUI	1900–11000	0,1–8	10
Cost-231	500–2000	1–20	30
Двухлучевая	300–30000	0,1–30	10
Ли	900	–	30
Уолфиша-Икегами	800–2000	0,1-5	50
ITU-R P.1238.8	900–6000	от 0,1	–

Влияние степени подвижности объекта

В [11] анализируется влияние мобильности на эффективность сетей подвижной радиосвязи. Отмечается, что для её повышения целесообразно использовать правильный математический аппарат, но вопросы синтеза обобщённой модели мобильности узлов сети требуют дальнейшего изучения. В настоящее время существует несколько направлений в моделировании мобильности объектов: детерминированная, полудетерминированная и случайная. Детерминированный подход, например, может описывать мобильность автомобилей, движущихся в городской зоне движения, где скорость транспортных средств ограничена, а также определено направление, в котором они могут двигаться [12]. Полудетерминиро-

ванную модель мобильности можно рассматривать для описания движения спасательных служб, туристических групп, мониторинга животных на сельскохозяйственных предприятиях. Случайная модель позволяет описать подвижность, например, биологических объектов в экологических исследованиях.

Отметим, что эти подходы имеют довольно общий характер и требуют уточнения. Поведение движущегося объекта (мобильного пользователя) описывается математическими моделями с элементами упрощения, а также имитационными, обеспечивающими большую реалистичность. В основе моделей, разрабатываемых с учётом особенностей системы связи с подвижными объектами, лежат модели случайных путевых точек, случайного блуждания, случайного направления, уличная случайная путевая точка, модель группы опорных точек (RPGM), манхэттенская модель мобильности; модель мобильности автострады [13, 14].

Для каждой из моделей задаётся набор метрик, отражающих её особенности. Примерами таких метрик являются пространственная и временная зависимости, относительная скорость, географические ограничения. Как модели мобильности, так и их метрики сильно зависят от поведения движущегося объекта, его назначения, требований со стороны связи к точности и показателям качества. Таким образом, нельзя однозначно выделить модель, являющуюся подходящей для описания системы связи со всеми видами объектов. Для определения перспективной модели необходимо чётко обозначить назначение такой системы, требования к ней и особенности поведения объектов (скорость, равномерность скорости, сценарий поведения, требования к дальности и качеству обслуживания для всех типов трафика).

В настоящее время существует два направления развития технологий связи с подвижными объектами: на основе систем специальной связи и на основе существующей инфраструктуры сетей общего пользования. Высказываются мнения, что организация обособленных специальных систем связи не рациональна и требует затрат экономических ресурсов, гораздо эффективнее задействовать готовые решения сетей общего пользования. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие: проектировать системы связи необходимо обратно совместимыми для лёгкой интеграции и использовании одних для целей других. Но это может и пагубно сказаться на безопасности, так как возникнут уязвимости из-за схожести общепринятых технологий, на которых реализуются сети общего назначения.

Еще один важный аспект – это влияние скорости объекта на качество связи. Для малоподвижных объектов влияние многих факторов практически незаметно, но с повышением скорости свыше 40 км/ч возникают некоторые проблемы [15]:

1) доплеровский сдвиг: высокие значения доплеровского сдвига, особенно на микроволновых частотах, может вызвать значительное изменение принимаемого сигнала; большинство моделей его никак не учитывают, эффект Доплера нивелируется программными средствами в приёмной части устройства;

2) хэндовер: характерен для сетей с базовыми станциями и необходим для поддержания активного соединения при переходе из одной соты в другую; из-за сверхвысокой скорости подвижного объекта необходимо минимизировать эту процедуру по времени;

3) многолучевое распространение: вторичным эффектом увеличения скорости является многолучевое распространение (приводит к изменяющимся во времени доплеровским разбросам и нестационарным замираниям, что способствует перекрытию поднесущих и, следовательно, вносит интерференцию между несущими; интерференция между несущими существенно повышает частоту BER; пока что единственная возможность решить эту проблему – увеличить расстояние между несущими, что повышает устойчивость, но, к сожалению, заметно снижает пропускную способность).

Современные подвижные средства могу развивать довольно высокие скорости – до 300 км/ч, что накладывает ограничения на использование, например, технологий сотовой мобильной связи.

Архитектура системы связи с подвижными объектами

С точки зрения архитектуры на сегодняшний день можно выделить способы передачи информации к подвижным объектам с помощью маяков и радиосистем.

С помощью маяков. Подвижный объект получает информацию только тогда, когда перемещается в непосредственной близости с физическими элементами, располагающимися вдоль трассы (маяками) (рисунок 3а). Такие системы реализуются чаще всего на основе технологий фиксированного радиодоступа.

С помощью радиосистем. Предполагается, что подвижный объект получит необходимую информацию, находясь в радиусе покрытия. Выделим два возможных сценария:

1) точка – точка: радиоканал организуется между ПУ и объектом (рисунок 3б);

2) точка – многоточка: устройство движется между базовыми станциями, которые осуществляют хэндовер (рисунок 3с).

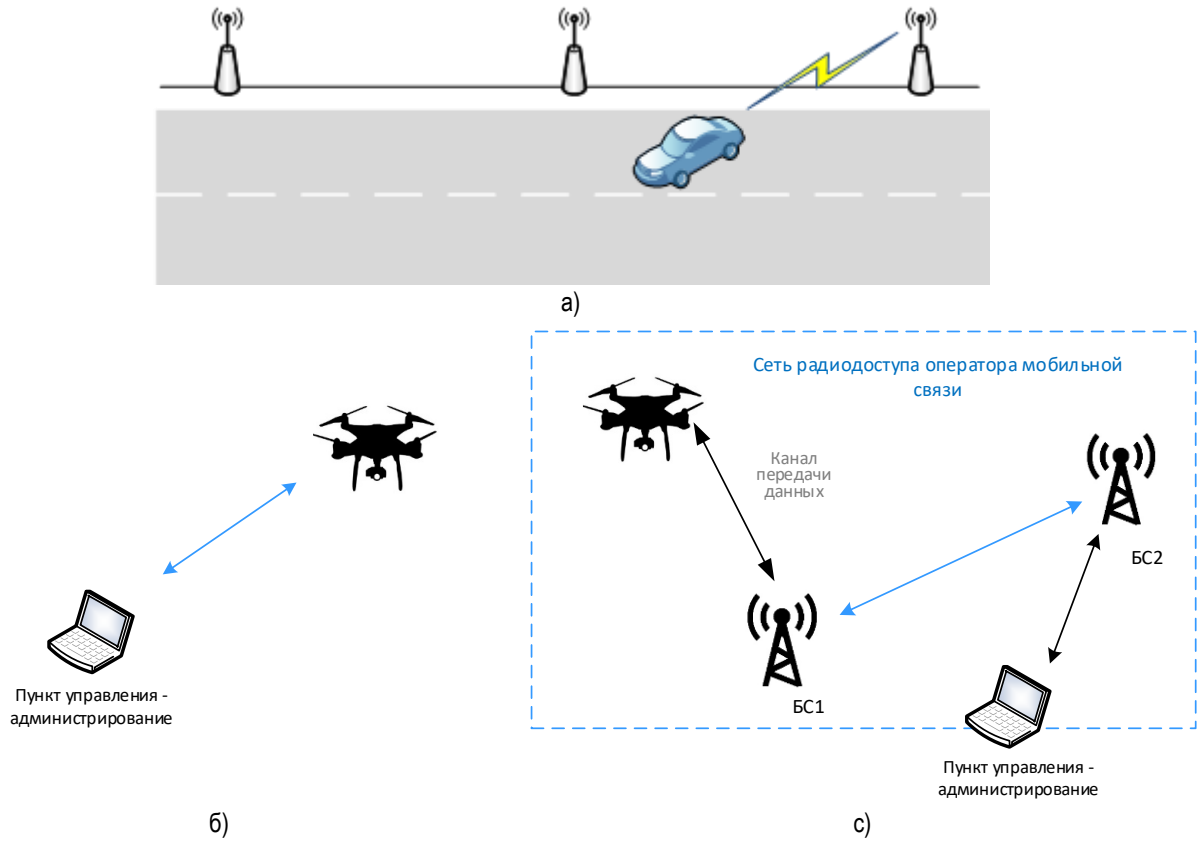

Рис. 3. Сценарий реализации систем связи с подвижными объектами на основе «маяков» (а) и с помощью радиосистем: б) точка – точка; с) точка – многоточка

Еще один важный аспект – это использование инфраструктуры, позволяющей хранить и обрабатывать данные, полученные с движущегося объекта, т. е. возможность подключения к ЦОД.

Анализ систем связи с беспилотными объектами

Существующие системы связи с подвижными объектами разделяются на специальные системы и системы сетей общего пользования. В настоящее время существует несколько технологий связи с подвижными объектами на основе сетей общего пользования. Первый тип – сети сотовой мобильной связи любого поколения. Такие системы неплохо справляются с передачей информации на борт БПЛА любого типа и в обратном направлении, а также подходят и для надводных беспилотных катеров. Такие системы подходят для мест с хорошо развитой сетевой инфраструктурой, например, для городской среды. При этом полученные данные экспериментов показывают необходимость ограничения скорости и высоты полёта БПЛА для успешной передачи видео, а канал управления не может быть реализован с требуемым качеством [3, 16]. В дальнейшем развитие сетей на основе 5GNR позволит сразу перейти к более перспективным решениям, в том числе включающим в себя элементы искусственного интеллекта [17]. Для мест с плохо развитой инфраструктурой обычно используют спутниковые системы связи для связи с беспилотными объектами наземной, воздушной и надводной систем [18, 19]. В этом случае БПЛА могут применяться в том числе в качестве ретрансляторов.

Следующий тип – технологии на основе стандартов IEEE 802.11. Это семейство технологий относится к фиксированной службе радиодоступа и хорошо работает с беспилотными объектами малой степени подвижности. Ранее был разработан стандарт IEEE 802.11p [20], работающий на частотах

5,85-5,925 ГГц (ориентирован на создание интеллектуальной транспортной системы и учитывает влияние эффекта Доплера). В настоящее время ведутся разработки стандарта IEEE 802.11bn, который является развитием IEEE 802.11p. Для него характерны повышение помехоустойчивости, увеличение пропускной способности до 1 Гб/с и радиуса действия, а также позиционирование. Предполагается, что он сможет поддерживать теоретическую скорость движущихся объектов до 500 км/ч. Другие стандарты данного семейства традиционно ограничены радиусом действия, при этом работают в перегруженных частотных диапазонах.

По сравнению с сетями общего пользования специальная связь имеет более расширенную архитектуру построения сети, соединяющей космическую, морскую, наземную и воздушную зоны (эшелоны), каждая из которых имеет свою специфику среды и технологии распределения [21]. Это приводит к необходимости создания разнообразных телекоммуникационных систем в рамках сетей связи специального назначения, мультиплексирования всех видов передаваемого трафика, установки граничных маршрутизаторов и повторителей, поддерживающих несколько стандартов передачи данных, которые должны отвечать установленным требованиям к качеству связи.

Исходя из задач, выполняемых сетями специального назначения, к ним предъявляются повышенные требования по надёжности, безопасности, своевременности и качеству обслуживания в процессе передачи информации. В ходе развития сетей специальной связи появилась необходимость интеграции различных видов услуг и обеспечения требуемого качества обслуживания.

Основными требованиями к сетям специального назначения являются обеспечение своевременности, достоверности и безопасности передаваемых сообщений. На выполнение этих требований оказывают влияние как внешние, так и внутренние воздействия. На сегодняшний день обеспечение специальной связи происходит через аренду у коммерческих операторов канальных и сетевых ресурсов для построения гибридных комплексов, обеспечивающих необходимую интеграцию между разными видами трафика и различными подвижными и стационарными узлами связи. Стационарный и мобильные узлы синхронизируются с транспортной сетью, обмен данными происходит по средствам спутниковой системы связи и отдельных оптоволоконных сегментов.

Заключение

Итак, отметим, что для любых беспилотных объектов важным является создание двух радиоканалов: дуплексный канал управления с небольшими пропускными способностями и высокими требованиями к качеству обслуживания и симплексный канал для передачи видеотрафика с большей пропускной способностью и более мягкими требованиями к задержкам и потерям (таблица 3). При этом задача создания таких каналов становится все более сложной по мере возрастания требований к дальности управления. Особенно это важно для наземных беспилотных аппаратов, так как существуют проблемы распространения радиоволн у поверхности Земли, экранирование элементами городской постройки и особенностями рельефа, переотражениями. Для надводных беспилотных систем особенно важным становится выбор частотного диапазона, так как брызги воды и туман создают сильное затухание радиоволн.

Таблица 3. Анализ факторов, учитываемых при разработке радиосвязи с беспилотным объектом

Влияющие факторы	Параметры			
Требования к услугам	Единые для всех беспилотных объектов: канал управления и канал передачи видео			
Типы среды распространения	воздух: влияние осадков	около поверхности земли: – прямая видимость – особенности рельефа – застройка	около поверхности воды (надводные): влияние паров воды	подводные (гидроакустические)
Диапазоны степени подвижности, км/ч	< 40	40–100	100–250	> 250
Варианты построения архитектуры	с маяками	с базовыми станциями	прямая видимость	

Сегодня есть несколько сценариев связи с беспилотными объектами: на маяках, на базовых станциях, с прямой видимостью. Все эти сценарии имеют свои достоинства и особенности использования, поэтому выбор сценария при реализации системы связи с беспилотным объектом является важной инженерной задачей. Существующие технологии в целом неплохо справляются с требованиями верхних уровней, но можно выделить две проблемы. Первая – обеспечение работы беспилотных систем в непосредственной близости друг от друга, например, на стройке или в плотной городской застройке. Здесь вопрос планирования покрытия и доступа к базовой станции можно решать с использованием методов искусственного интеллекта, которые помогут оптимизировать размещение точек доступа в высокоплотной среде. Вторая – это увеличение дальности связи для всех типов беспилотных объектов. Эту задачу решают или через внедрение ретрансляторов, или через использование систем спутниковой связи. Оба эти сценария имеют ограничения, поэтому задача увеличения дальности связи в прямой видимости является одной из самых востребованных. Отдельно отметим развитие гидроакустических каналов, которые позволят сделать подводный Интернет вещей – важную часть развития систем автоматизации окружающей среды человечества.

Литература

1. Rec. ITU-T Y.1541 (12/2011) Network performance objectives for IP-based services.
2. Laufer G. H.266 to the public: practical or unrealistic? 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.30177.84321
3. Баранов А. А., Никитина А. В., Симонина О. А. Исследование возможности использования сетей мобильной связи общего пользования для передачи видеоданных с борта БЛА // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 1. С. 16–26. DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-1-16-26. EDN: DBJQHN
4. Викулов О. В. Перспективные беспилотные летательные аппараты вертолетного типа отечественного производства // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2023. № 1. С. 70–82. EDN: EVPBAX
5. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3(152). С. 147–158. EDN: SBYZAV
6. Каштанов В. В., Немтинов В. А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28. № 4. С. 606–614. DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.606-614. EDN: FNTDNM
7. Душин С. В., Шаврин С. С., Алешин В. С., Фархадов М. П. Тенденции и перспективы развития беспроводной подводной связи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2020. Т. 10. № 2. С. 11–18. EDN: ISOJOA
8. Пожидаев В. Н. Ослабление и обратное рассеяние миллиметровых радиоволн в тумане, дожде, снегопаде // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». М.: ИРЭ РАН, 2010. Т. 29. С. 744–748. URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/4conf/docs/pdffiles/p13.pdf (дата обращения 07.03.2024)
9. Степаков А. В., Тимошин Д. И. Применение перспективных каналов передачи данных для доведения информации до надводных и глубокопогруженных подводных объектов Военно-Морского Флота // Военная мысль. 2023. № 10. С. 69–73. EDN: CXMLOW
10. Tavsanoglu A., Briso C., Carmena-Cabanillas D., Arancibia R. B. Concepts of Hyperloop Wireless Communication at 1200 km/h: 5G, Wi-Fi, Propagation, Doppler and Handover // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 983. DOI:10.3390/en14040983
11. Upadhyaya N., Shah J. S. AODV Routing Protocol Implementation in VANET // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 2. PP. 585–595.
12. Romanenko I., Zhyvotovskyi R., Petruk S., Shishatskiy A., Voloshin O. Mathematical model of load distribution in telecommunication networks of special purpose // Information Processing Systems. 2017. Vol. 3. PP. 61–71. DOI: 10.30748/ soi.2017.149.13
13. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // Wireless Communications and Mobile Computing. 2002. Vol. 2. Iss. 5. PP. 483–502.
14. Sichitiu M. Mobility Models for Ad Hoc Networks // In: Misra S., Woungang I., Misra S. C. Guide to Wireless Ad Hoc Networks. London: Springer, 2009. PP. 237–254. DOI: 10.1007/978-1-84800-328-6_10

15. Banerjee S., Hempel M., Sharif H. A Survey of Wireless Communication Technologies & their Performance for High Speed Railways // Journal of Transportation Technologies. 2016. Vol. 6. PP. 15–29. DOI: 10.4236/jtts.2016.61003

16. Jeong H. H., Lee J., Park S. A Study on Data Acquisition in the Invisible Zone of UAV through LTE Remote Control // Korean Journal of Remote Sensing. 2019. Vol. 35. Iss. 6_1. PP. 987–997. DOI: 10.7780/KJRS.2019.35.6.1.9

17. Nakamura T. 5G Evolution and 6G // Proceedings of the Symposium on VLSI Technology. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265094

18. Пантелеймонов И. Н., Белозерцев А. В., Монастыренко А. А., Боцва В. В., Наумкин А. В. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6(723). С. 78–88. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88

19. Каретников В. В., Пащенко И. В., Зайцев А. И. Основные аспекты использования современных инфокоммуникационных технологий для обеспечения беспилотного судовождения на водном транспорте // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 1(35). С. 170–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-170-179. EDN: VMAZCJ

20. IEEE 802.11p-2010. IEEE Standard for Information technology. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments.

21. Klochkov Y., Glushkova A., Gazizulina A., Koldov E. Standardization of Road Quality Assessment by Developing Mobile Applications // Proceedings of the Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2020. Vol. 12525. PP. 176–193. DOI: 10.1007/978-3-030-65726-0_17

Статья поступила 11 марта 2024 г.
Одобрена после рецензирования 25 марта 2024 г.
Принята к публикации 26 марта 2024 г.

Информация об авторах

Симонина Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: olga.simonina@sut.ru

Чернышов Артем Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: chernyshov.ag@sut.ru

Analysis of the Use and Development of Wireless Communication Technologies with Unmanned Objects

O. Simonina ✉, A. Chernyshov

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. *In today's world, unmanned vehicles are becoming increasingly common, and the need to control them is becoming more pressing. These vehicles can move at various speeds and in diverse environments, such as air, land, water, and surface. Due to the varying propagation medium, it is essential to develop a method for selecting the appropriate radio channel for each type of unmanned vehicle. The aim of this work is to investigate the main trends in communication with different types of unmanned devices and to identify the challenges and opportunities for developing communication technologies for these devices.* ***Methods:*** *This study will analyze scientific literature and other relevant sources to gain a comprehensive understanding of the current state of communication with unmanned systems .* ***Novelty:*** *This paper presents a unified approach to the design of communication systems for unmanned objects, taking into account the various aspects of the operating environment, such as speed of movement and application features. The focus is on the technical implementation of the system, but also on the selection of appropriate technologies that meet the specific requirements of each scenario.* ***Results:*** *The paper demonstrates that the choice of technology depends on the requirements of the services provided, the nature of the environment in which the object operates, and the speed with which it moves. It also emphasizes the importance of considering the specific conditions of use for unmanned systems, as well as the impact that the intended use scenario has on the architecture of the radio network. A review of different wireless access technologies is conducted, and recommendations are provided for selecting the most appropriate technology for establishing a radio link with unmanned vehicles, depending on the specific purpose.* ***Theoretical and practical significance:*** *The tasks of research and development to improve these technologies have been outlined, which will help to narrow the scope of search tasks in the development and study of new radio systems for communication with unmanned objects.*

Keywords: *unmanned objects, radio communications, distribution environment, factors influencing the quality of the radio channel*

Information about Authors

Olga Simonina – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Radio Communication and Broadcasting (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: olga.simonina@sut.ru

Artyom Chernyshov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Radio Communication and Broadcasting (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: chernyshov.ag@sut.ru

EDN: RZSDQB
URL: https://vestnik-sut.ru/2024-1/C03.pdf