

УДК 621.39

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВЯЗИ С БПЛА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Куликов Г.В., д.т.н., проф., E-mail: kulikov@mirea.ru

Тамбовский С.С., студент, E-mail: sstambovskiy@gmail.com

МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние различных параметров канала связи в условиях сильной городской застройки на качество передачи информации с беспилотным летательным аппаратом при использовании различных видов модуляции.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), цифровые системы связи, многолучевое распространение, высокая плотность городской застройки

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF COMMUNICATION WITH THE UAV IN URBAN TERRAIN

Kulikov G., V., D.ofSci.(Tech), prof., E-mail: kulikov@mirea.ru

Tambovsky S. S., student, E-mail: sstambovskiy@gmail.com

MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. This article examines an impact of various parameters of the communication channel under high urban development on quality of transmission of digital information with usage of different modulation types

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAV), digital communication systems, multipath propagation, high urban development.

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нашли широкое применение во многих областях человеческой жизни. Изначально предназначенные для ведения боевых действий и наблюдения за противником, со временем они начали использоваться и для гражданских задач: доставки грузов, мониторинга земной поверхности, различных промышленных объектов, таких как заводы и промышленные предприятия. Стоит отметить успешное применение БПЛА службами спасения для поиска без вести пропавших в труднодоступных зонах [1]. Однако, несмотря на достаточно обширный диапазон решаемых задач, многие технические проблемы остаются нерешенными. Одной из таких проблем является использование БПЛА в городах и пригородах с сильной застройкой. Поясним, чем отличаются данные зоны от других. В любом городе, вне зависимости от степени застройки, есть здания различной этажности, улицы, лесопарковые зоны и возможное непостоянство форм рельефа местности. При этом радиосигнал, принимаемый и передаваемый БПЛА, отражается от различных объектов, их поверхностей, претерпевает затухания [2], то есть канал связи

является многолучевым. Помимо этого в городе присутствуют другие устройства, использующие частотный ресурс, промышленные помехи различного рода, а также возможно наличие преднамеренных помех. Все вышеперечисленные воздействия являются дестабилизирующими факторами, которые приводят к искажению информации в процессе приема-передачи и возможной потере контроля над БПЛА.

Полные характеристики распространения электромагнитных волн можно получить, решая уравнения Максвелла при определенных условиях, которые отображают физические характеристики создающих препятствия объектов. Хорошие практические результаты дает учет рельефа подстилающей поверхности на основе физического принципа Гюйгенса-Кирхгофа [13]. Поскольку эти вычисления трудновыполнимы, а во многих случаях отсутствуют необходимые для этого параметры, для получения характеристик распространения сигналов часто используются методы аппроксимации, не требующие решения сложных уравнений. Примером такого подхода являются формулы, полученные в работах Н.И. Бардина [8], Г.З. Рубина [9], П.Н. Трифонова [10], Д. Окамуры [11], Хата [12]. Известны и широко используются модели Окамуры-Хата, COST231-Nata, Уолфица, Хата-Дэвидсона, Ксиа-Бертони.

Но многие из существующих эмпирических моделей, хотя и достаточно полно описывают особенности исследуемого радиоканала, не удовлетворяют требованиям, возникающим при разработке современных систем связи, в частности, не учитывают эффектов, возникающих при движении объектов, а также сложную помеховую обстановку в радиоканале.

В данной работе на основе изучения перечисленных методов рассчитаны энергетические параметры (отношение сигнал/шум+помеха) радиоканала «воздушное судно (в частности, БПЛА) – земля», реализованы и исследованы модели многолучевого распространения сигнала в различных условиях, в том числе для самого сложного случая – в условиях сильной городской застройки.

На первом этапе моделирования определяются положения воздушного судна (ВС, БПЛА) и наземных приемопередатчиков (рис. 1а), а также границы городской застройки, характер рельефа загородной местности и формируется траектория распространения прямого сигнала. В модели предусматривается возможность имитации движения, как БПЛА, так и наземных приемопередатчиков. На втором этапе учитывается траектория отраженного от земной поверхности сигнала (рис. 1б) в соответствии с методами моделирования двухпутного распространения радиоволн. Отраженный от земной поверхности сигнал изменяет свои параметры (флуктуации

амплитуды по закону Релея и изменения фазы сигнала по равномерному закону). На вход наземного приемника поступает сумма сигналов, распространяющихся по прямому и отраженному лучу. На третьем этапе сигнал, отраженный от земной поверхности, подвергается аналогичному разделению на прямой луч и луч, отраженный от зданий (рис. 1в). Этот процесс повторяется и на последующих этапах, причем на каждом следующем этапе интенсивность отраженного луча уменьшается. Исследовались три ситуации: однолучевое распространение только по прямому лучу, двухлучевое распространение (прямой и отраженный луч), многолучевое распространение (прямой и несколько отраженных лучей).

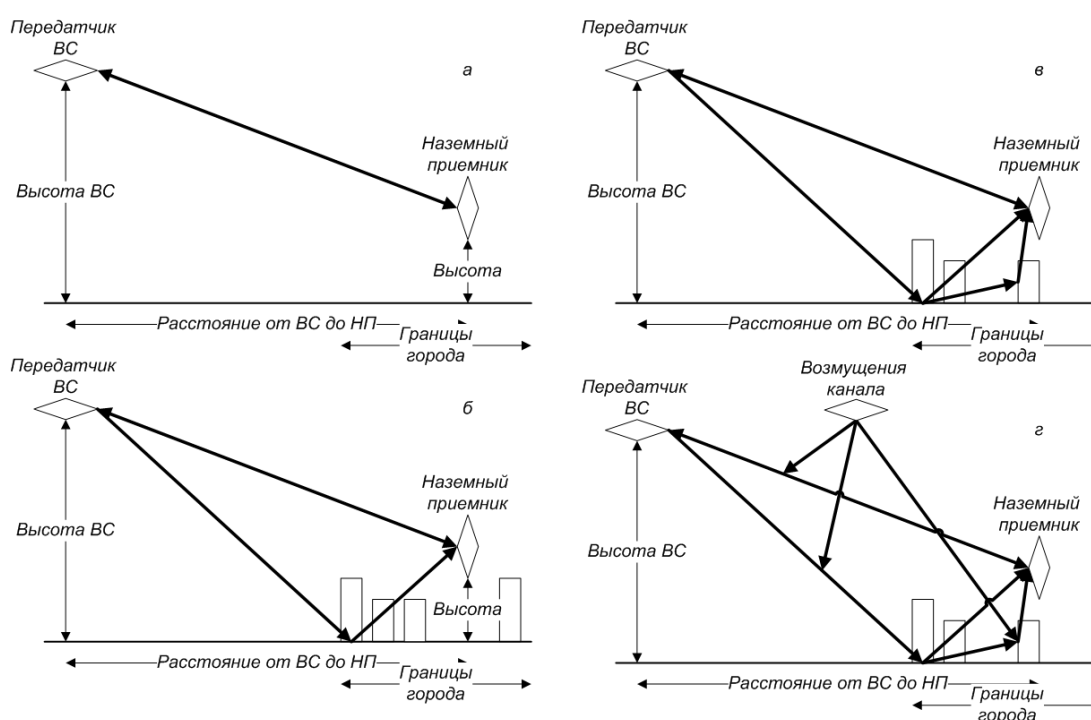


Рис. 1. Модель распространения сигнала в городских условиях

Для учета влияния помеховой обстановки к принятому сигналу добавляются помехи (рис. 1г). Помехи могут представлять собой как простой флуктуационный шум, так и совокупность мешающих воздействий, характерных для конкретного радиоканала, например, импульсных помех.

В модели использован коэффициент M , характеризующий уровень сигнала, отраженного от подстилающей поверхности или поверхности каких-либо объектов (строений). Его величина изменялась от 0 до 0,5, что при малых значениях соответствует слабоотражающим рассеивающим поверхностям (трава, лес и т.п.), а при больших – сильноотражающим поверхностям (асфальт улиц, стены домов и т.п.).

Кроме того, в модели был заложен параметр, характеризующий скорость изменения характеристик отраженного луча (задержка, флуктуации амплитуды и фазы). Это позволило смоделировать ситуации, возникающие при разной скорости движения приемника и передатчика. Используются значения $0 \leq V \leq 1$, соответствующие отношению частоты изменения амплитуды и фазы и скорости передачи информации. Предполагалось также вначале, что передача дискретной информации осуществляется с помощью бинарной фазовой манипуляции.

Графики, полученные в ходе моделирования, представлены на рис. 2 – 5. Первые два графика построены для двухлучевого распространения (прямой и отраженный луч), вторые два – для трехлучевого.

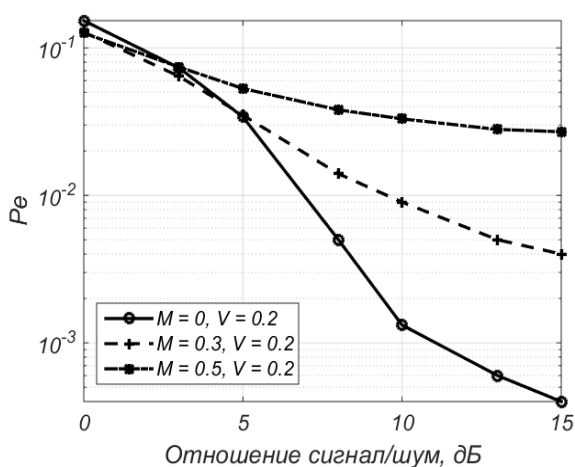


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (в дБ) в двухлучевом канале для $V = 0,2$

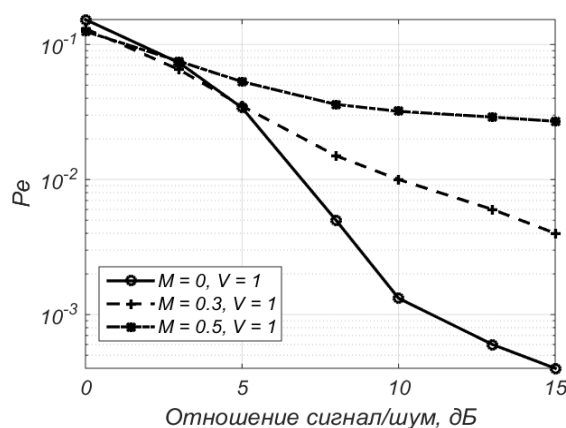


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (в дБ) в двухлучевом канале для $V = 1$

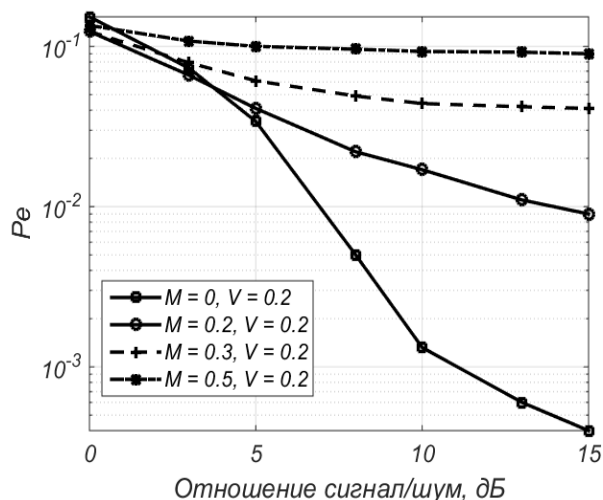


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (в дБ) в трехлучевом канале для $V = 0,2$

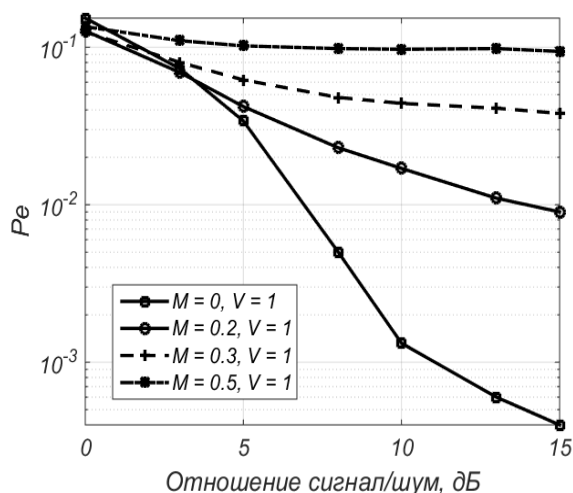


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (в дБ) в трехлучевом канале для $V = 1$

Результаты показывают сильное влияние многолучевости на качество приема сигнала. Так, если при малых величинах коэффициента M наблюдается ухудшение вероятности ошибки до 3-10 раз при двухлучевом и трехлучевом канале), то при $M = 0,5$ вероятность ошибки становится недопустимо большой (до 10^{-1}). Увеличение числа лучей также сильно сказывается на качестве приема. В частности, можно утверждать, что уже при $M = 0,2$ в трехлучевом канале вероятность ошибки увеличивается до 10^{-2} , что также недопустимо.

Видно, что скорость флуктуаций отраженных лучей, определяемая относительной взаимной скоростью движения приемники и передатчика даже в исследованном диапазоне V несильно сказывается на качестве приема сигнала. В

реальности же эта скорость значительно ниже, чем в промоделированной ситуации, а именно, величина $V \ll 0,1$.

Влияние индустриальной помехи было промоделировано добавлением импульсной помехи с разной частотой повторения $F_{\text{ип}}$ и релейским законом распределения амплитуды. При этом принимались значения $F_{\text{ип}} = 1/T$ и $F_{\text{ип}} = 1/10T$, а нормированная дисперсия релейского закона была равной 0,43 и 4,3. Можно говорить, что при $F_{\text{ип}} = 1/T$ отношение сигнал/импульсная помеха $P_c/P_{\text{ип.ср}}$ в первом случае равно 2,3, во втором $P_c/P_{\text{ип.ср}} = 0,23$, а при $F_{\text{ип}} = 1/10T$ это отношение, соответственно, равно 23 и 2,3.

Комплексную ситуацию, когда в радиоканале воздействуют все искажающие факторы демонстрирует рис. 6.

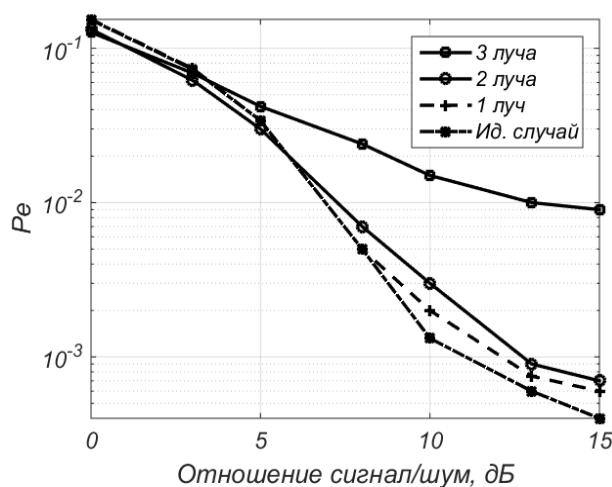


Рис. 6. Влияние комплексного воздействия мешающих факторов в многолучевом радиоканале

Было установлено, что влияние импульсной помехи не столь заметно, как влияние многолучевости, и при малой интенсивности такой помехи ею можно пренебречь. Ее влияние становится ощутимым при величинах $P_c/P_{\text{ип.ср}} < 2$. Кроме того, влияние такой помехи заметно снижают известные методы борьбы, например, схема ШОУ.

Проведенное моделирование влияние доплеровского эффекта показало, что при взаимной скорости движения приемника и передатчика до 500 км/час, никакого ухудшения характеристик помехоустойчивости не зафиксировано.

Проведены расчеты отношения сигнал/шум в радиоканале для разных частотных диапазонов, полос пропускания радиоканала (скоростей передачи информации) и типов местности наземного сегмента. Результаты показывают, что в отсутствие индустриальных шумов с увеличением рабочей частоты f отношение сигнал/шум заметно снижается, хотя и остается достаточно большим для надежной радиосвязи. Так, например, при $f = 2$ ГГц, мощности передатчика 10 мВт, полосе приемника $\Delta f_{\text{ш}} = 2$ ГГц и удалении

воздушного судна более 100 км отношение сигнал/шум равно 22 дБ, что при использовании бинарной фазовой модуляции дает вероятность ошибки менее 10^{-7} . На частоте 10 ГГц это отношение падает до 15 дБ. Ситуация значительно изменяется, если учитывать промышленные помехи, характерные для городских районов и имеющие большую интенсивность в низкочастотных диапазонах. На рис. 7 показаны графические зависимости, построенные по полученным расчетным данным при высоте полета воздушного судна 2 км. Здесь приведены значения отношений сигнал/шум с учетом промышленных помех для разных диапазонов рабочих частот, полос пропускания приемников при величине коэффициента шума приемника $K_{ш} = 4$ и разных углов места воздушного судна (при угле места 0° расстояние между приемником и передатчиком равно 2 км, при 89° - 114 км).

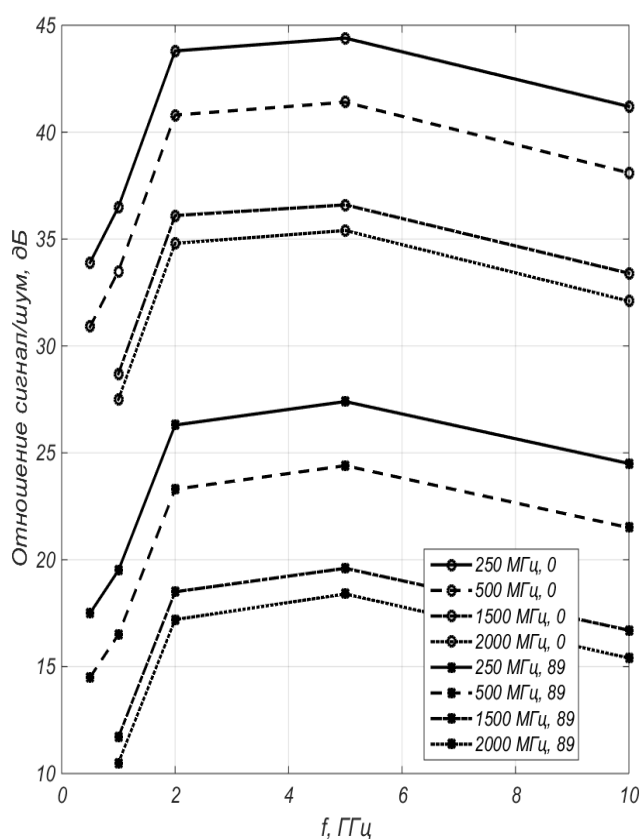


Рис. 7. Графики зависимости отношения сигнал/шум с учетом промышленных помех (в дБ) от рабочей частоты при разных полосах пропускания приемника и углах места (0° и 89°) воздушного судна

Значительный рост уровней промышленных помех при уменьшении рабочей частоты приводит к тому, что отношения сигнал/шум в диапазонах 0,5 – 1 ГГц сильно снижаются. В диапазоне же 5-10 ГГц уровни промышленных помех невелики, но с увеличением

рабочей частоты увеличивается затухание полезного сигнала, и результирующее отношение сигнал/шум также снижается, хотя и не так заметно. Таким образом, максимум отношения сигнал/шум приходится на область 2-5 ГГц, и эта область представляется предпочтительной для использования в перспективных системах связи с БПЛА.

Влияние многолучевости распространения радиоволн ухудшает эту ситуацию. Так, при малом числе лучей и малом коэффициенте отражения поверхностей $M = 0,1-0,2$ можно ожидать снижения отношения сигнал/шум дополнительно на 2-3 дБ. При увеличении числа лучей и увеличении коэффициента отражения поверхностей M до 0,3-0,4 снижение отношения сигнал/шум может достигать 10-15 дБ. При этом полезный сигнал может полностью маскироваться помехами, следовательно, при построении приема-передающих устройств необходимо предусмотреть разработку способов борьбы с многолучевостью и методов адаптивной коррекции характеристик радиоканала.

Полученные результаты являются актуальными для современных каналов связи и могут использоваться при проектировании современных и перспективных систем связи «воздушное судно-земля», в частности с БПЛА.

Качество связи в радиоканале напрямую определяется видами используемых сигналов и протоколами обмена информацией. Определенных стандартов по использованию тех или иных видов модуляции в системах радиосвязи с БПЛА сейчас не существует. Рассмотрим влияние параметров многолучевости в канале связи с БПЛА на характеристики помехоустойчивости при использовании классических видов модуляции: QAM, M-PSK, M-FSK. Это позволит сделать выводы, необходимые для разработки наиболее подходящих технических решений и стандартов.

Исследуемая модель канала, реализованная как программная модель, включает в себя возможность задания местоположения БПЛА относительно наземного пункта управления (геометрические соотношения высот и расстояний), рабочего частотного диапазона, количество отраженных лучей, их интенсивности μ (коэффициент отражения подстилающих и отражающих поверхностей) и временных задержек распространения.

Ниже приведены результаты проведенных исследований. Все нижеприведенные результаты были получены при следующих параметрах: высота расположения БПЛА – 2 км, высота расположения наземного пункта – 3м, удаление БПЛА от наземного пункта – 100 км, отношение сигнал/шум $Eb/No = 7$ дБ.

Вначале были исследованы частотные зависимости модуля коэффициента передачи канала $A(f)$ от количества лучей и их ослабления. На рис. 8 для сравнения приведены

графики, характеризующие влияние количества лучей ($N = 2, 6, 10$) на величину коэффициента передачи канала, а на рис. 9 рассмотрен двухлучевой канал с изменяющимися значениями интенсивности отраженного луча μ .

Из полученных зависимостей можно сделать вывод о сильной неравномерности коэффициента передачи и, как следствие, существенном искажении формы спектра сигнала в многолучевом канале, при этом, понятно, что в реальном канале при движении БПЛА данный параметр будет иметь случайный характер, определяющийся ослаблениями и усилениями сигнала в разных частотных сегментах.

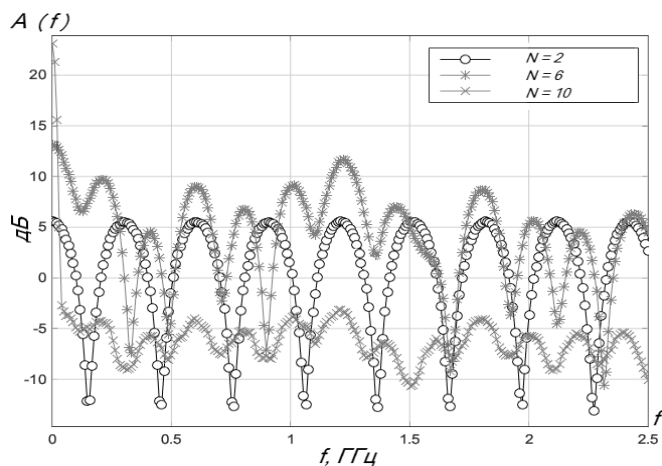


Рис. 8. Изменение модуля коэффициента передачи канала при разном числе лучей в канале связи

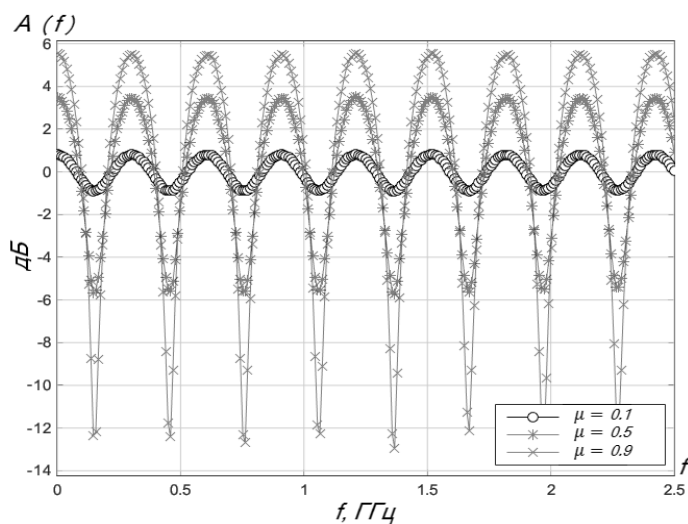


Рис. 9. Изменение модуля коэффициента передачи двухлучевого канала при различных значениях интенсивности второго луча μ

В настоящее время в системах связи БПЛА используются сигналы формата BPSK, 4QAM, 16QAM [3]. Интересным представляется изучение и сравнение помехоустойчивости различных видов модуляции при распространении радиоволн в описываемой среде.

Были исследованы сигнальные форматы, а именно, M-FSK (некогерентный прием), M-PSK и QAM с различными индексами позиционности M . Приведем сравнительные наборы графиков для данных типов модуляции при различных конфигурациях канала.

На Рис. 10 показаны зависимости вероятности ошибки P_e приема двоичного символа от количества лучей N , распространяющихся в канале. Заметно, что эффект многолучевости для некоторых типов модуляции приводит к резкому ухудшению этого показателя помехоустойчивости на 2-3 порядка.

На Рис. 11 приведены зависимости вероятности ошибки P_e от интенсивности второго луча для различных сигнальных форматов. При увеличении этого показателя также происходит ухудшение вероятности ошибки до 2-3 порядков. Наибольшей устойчивостью, как показало моделирование, обладают сигналы формата M-FSK.

Рис. 12 иллюстрирует изменение вероятности ошибки P_e приема двоичного символа от значения частоты несущей для различных сигнальных форматов. Изменение несущей частоты моделировалось вариацией временной задержки сигналов отраженных лучей в соответствии с геометрическим расположением приемника и передатчика в исследуемом радиоканале при вышеуказанных параметрах. Можно наблюдать определенную периодичность изменения этого показателя по частотному диапазону, что является следствием сложения принимаемых лучей с различными фазами.

Очевидно, что обеспечение надежной и качественной связи с БПЛА при передаче цифровой информации в сложных условия городской застройки зависит от правильно выбранного типа модуляции. Из полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования в этом случае сигналов формата 2-PSK (BPSK), 4QAM и различных многопозиционных сигналов M-FSK. Учитывая хорошие показатели последнего формата, направлением дальнейшего исследования предполагается анализ использования в рассматриваемом радиоканале сигналов формата CPFSK (модуляция с непрерывной фазой) с различными индексами модуляции и позиционностью, в частности сигналов MSK (минимальная частотная манипуляция) и CPFSK с индексами модуляции 0.5 и 0.75 [4,5], вместе с системами MIMO и OFDM [1,6,7].

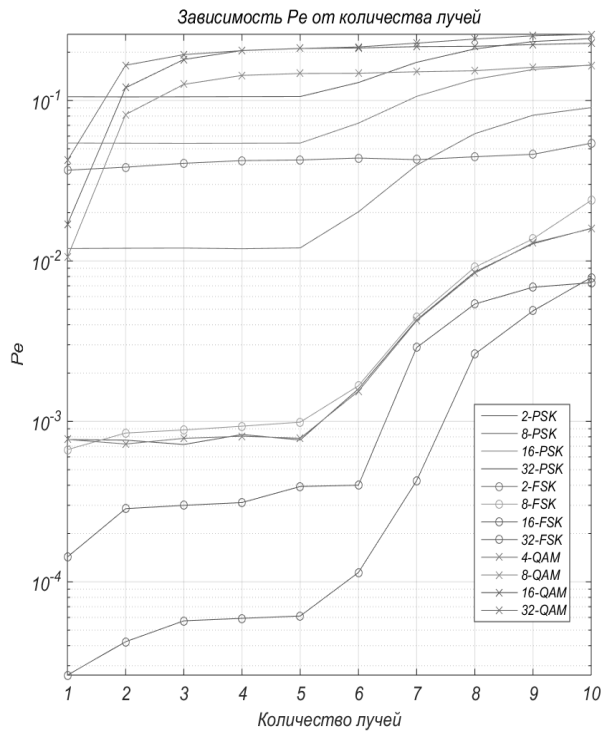


Рис. 10. Зависимость вероятности ошибки P_e от количества лучей N для различных сигнальных форматов

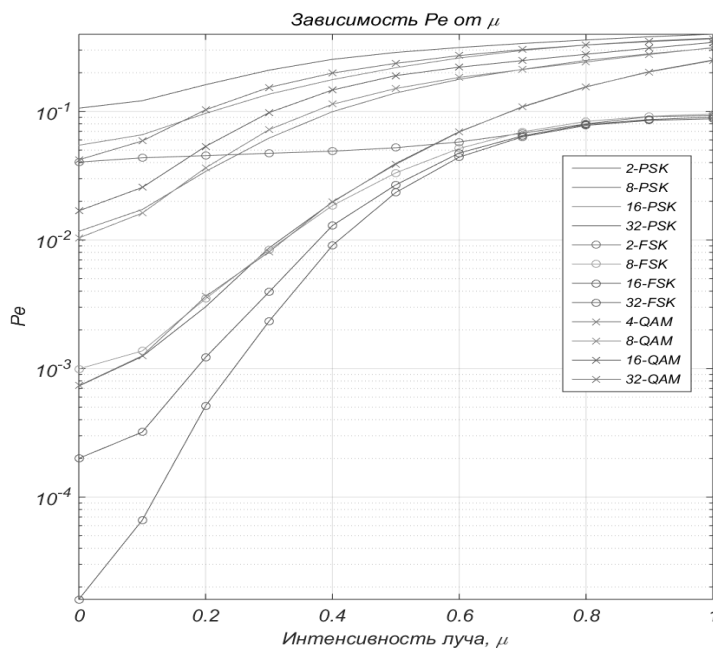


Рис. 11. Зависимость вероятности ошибки P_e в двухлучевом канале от интенсивности μ отраженного луча для различных сигнальных форматов

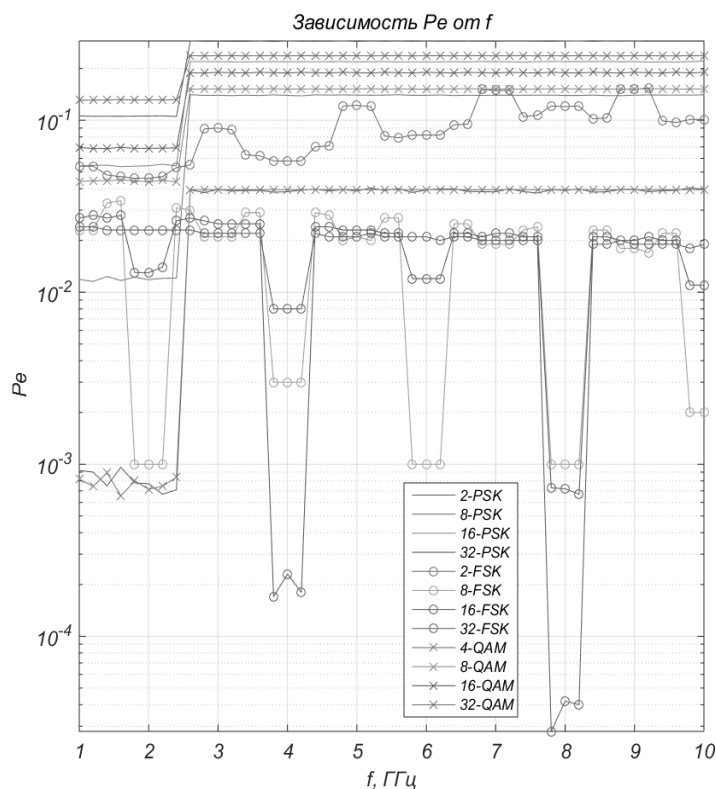


Рис. 12. Зависимость вероятности ошибки P_e для различных сигнальных форматов от несущей частоты сигнала

Список литературы

1. Reg Austin. Unmanned Aircraft Systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 333 p.
2. Полынкин А.В., Ле Хыу Туан. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия ТулГУ. Технические науки, 2013. – №7-2.
3. Боев Н. М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов // Труды МФТИ, 2014 – Т.6 – № 2.
4. Куликов Г.В. Помехоустойчивость приемников модулированных сигналов с непрерывной фазой при наличии нефлуктуационных помех // Радиотехника, 2003. – №7.
5. Богаченков А.Н., Куликов Г.В., Парамонов А.А. Испытания программно-математической модели демодулятора сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции // Научный вестник МИРЭА, 2006. – №1.
6. Seybold J.S. Introduction to RF propagation. – Willy Interscience Inc., 2005. – 320 p.

7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
8. Seybold J.S. Introduction to RF propagation. – Willy Interscience Inc., 2005. – 320 p.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
10. Бардин Н.И., Дымович Н.Д. Распространение ультракоротких радиоволн в условиях крупного города. Электросвязь, 1964, № 7, с. 15-18.
11. Рубин Г.З. Формулы для расчета напряженности поля в УКВ диапазоне / Г.З. Рубин. ГСПИ. М., 1980.
12. Трифонов П.Н. Пространственная напряженность поля УКВ в большом городе // Всесоюзная научная сессия, посвященная дню радио. Тез. докл. Ч.2. – М.: Радио и связь. 1982.
13. Okamura J. et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service // Rev. Inst. Elec. Eng. – 1968. – V.16. – №9-10. – p. 825-873.
14. Nata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service. IEEE Trans. Veh. Technol., 1980, v. VT-29, no. 3, p. 317-325.
15. Дымов А.В. Моделирование распространения УКВ радиоволн в условиях города с учётом рельефа подстилающей поверхности: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Ярославль, 2010. – 138 с.