

Экспериментальные исследования предельно достижимых параметров скрытного радиоканала управления подвижными объектами в условиях многолучевого распространения

В. А. Ботов, Л. Н. Казаков, Е. А. Селянская, Д. М. Соловьев

Исследованы предельно достижимые параметры низкоскоростного радиоканала управления подвижными объектами: скорость передачи данных, дальность, скрытность в условиях многолучевого распространения и ограниченной мощности передающего устройства. Для сигнально-кодовой конструкции DBPSK+PC (63,32,6) получен уровень скрытности порядка -40 дБ на дальностях до 100 км при битовой ошибке 10^{-6} , мощности передатчика до 10 дБм и скоростях передачи порядка единиц кбит/с. Коэффициент расширения спектра реализован прямым методом на основе двух вложенных М-последовательностей и суммарно составил величину около 2^{15} . Достижимость заявленных параметров подтверждена экспериментально на комплексе полунатурного моделирования и в процессе натурных испытаний с применением беспилотного летательного аппарата. В процессе натурных испытаний экспериментального образца выполнен цикл исследований по выбору наиболее эффективных антенных устройств по предельным характеристикам для передатчика и приемника, находящихся на земле, для передатчика, находящегося на борту летательного аппарата. Выполнен цикл исследований экспериментального образца на специализированном полигоне РТР, подтвердивший требуемые параметры по скрытности.

Ключевые слова: скрытность радиосвязи, предельно достижимые параметры, многолучевой канал, доплеровское расширение, экспериментальные исследования.

1. Введение

В последнее время наблюдается устойчивый интерес к системам радиосвязи, позволяющим скрытно передавать разнородную информацию. Примером могут служить каналы управления беспилотными летательными аппаратами [1]. Одним из наиболее используемых методов скрытной передачи является расширение спектра сигнала передающего устройства. В результате мощность полезного сигнала в точке приема может оказаться существенно ниже мощности шума (сигнал скрывается под шумом) [2, 3]. При этом качество приема при соответствующем сжатии, основанном на известном алгоритме расширения, практически не страдает. В свою очередь, для сканирующего стороннего приемника при неизвестном алгоритме расширения принимаемый сигнал будет энергетически «незаметным». В отсутствие априорной информации о структуре сигнала можно судить о факте передачи только по наличию уровня мощности, превышающего уровень шума. Естественным критерием скрытности является отношение сигнал/шум по мощности в полосе приемника либо отношение спектральных плотностей мощности. Соответственно, полоса сигнала, необходимая для передачи информационного сигнала, расширяется за счет дополнительной модуляции неэнергетического параметра.

2. Постановка задачи

Геометрическая интерпретация постановки задачи на разработку скрытной системы передачи приведена на рис. 1, где сплошной линией показан радиоканал между двумя объектами, подлежащий «закрытию» (дуплексный или полудуплексный с временным разделением). В любой точке пространства, за исключением окружающей объекты охранной зоны (показана штриховой линией), отношение спектральных плотностей мощности сигнала и шума сканирующего радиоприемного устройства (СП) не должно превышать заданной величины, определяющей энергетическую скрытность системы. Для примера согласно рис. 1 эта величина составляет -20 дБ. Предполагается, что оба передатчика имеют одинаковую мощность, приемные тракты объектов и СП обладают одинаковой шумовой полосой.

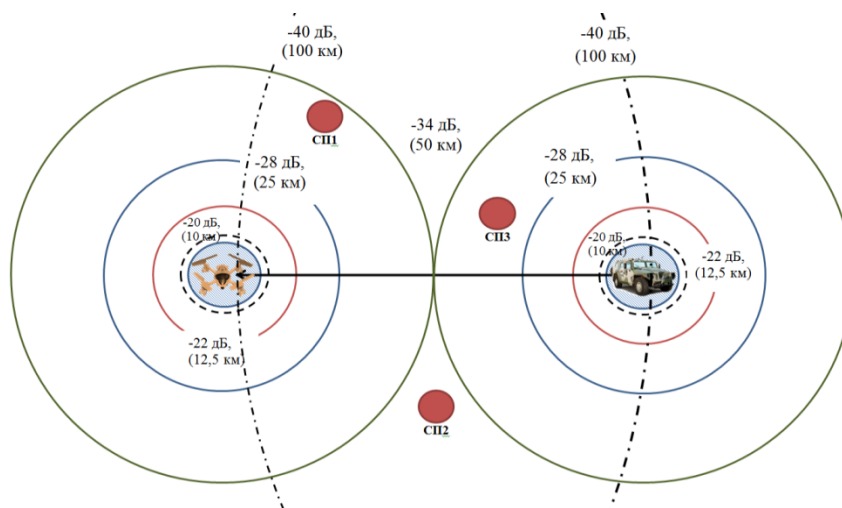


Рис. 1. Геометрическая интерпретация постановки задачи

Ниже задача скрытной передачи будет решена в условиях ограничений на полосу сигнала (обусловлено технологическими возможностями). При заданной скорости передачи это ограничивает максимальный коэффициент расширения спектра, соответственно зависящий от него эффект энергетической скрытности [2]. Для низкоскоростных каналов с ограниченной частотной полосой (передача команд управления, передача телеметрической информации, навигационной информации) эффект будет максимальным, для высокоскоростных каналов передачи (передача видео, данных) эффект минимален. На рис. 2 приведено семейство зависимостей отношения сигнал/шум от расстояния до сканирующего приемника для заданной величины коэффициента расширения. Штриховой линией показана граница уверенного приема в основном канале.

Согласно рисунку рост коэффициента расширения B в два раза повышает скрытность на 3 дБ. Соответственно на удалении до 100 км при $B = 2^{15}-1$ скрытность составляет -40 дБ.

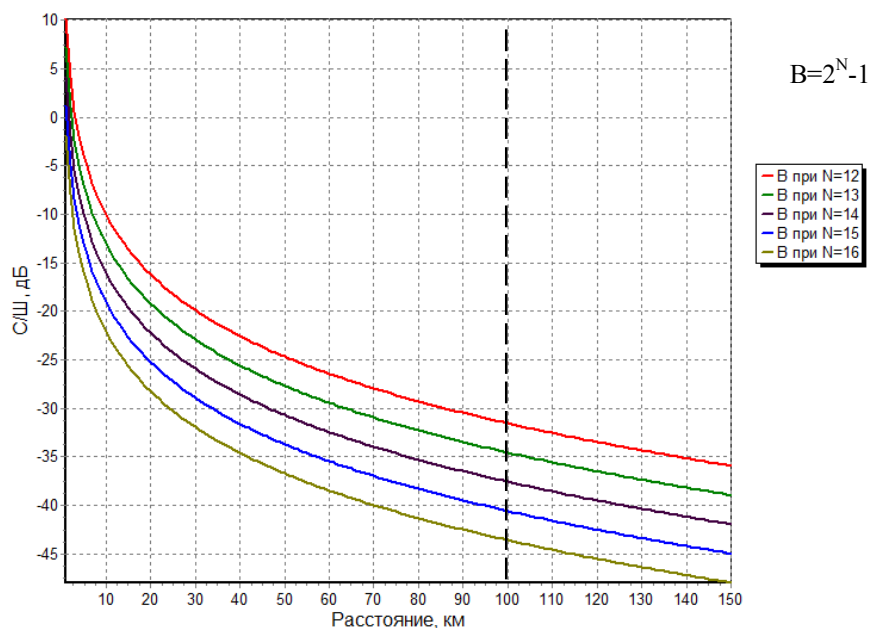


Рис. 2. Отношение сигнал/шум на входе сканирующего приемника для скорости передачи $R = 1$ кбит/с для разных расширений

При расчетах использовалось основное уравнение для отношения P/N на входе приемного устройства [2]:

$$\frac{P}{N} = P_0 + G_{TX} + G_{RX} - NF - Loss + 174 - 10 \lg \Delta F, \quad (1)$$

где P – мощность сигнала на входе приемника, N – мощность шума на входе приемника в шумовой полосе, P_0 – выходная мощность передатчика, G_{TX} – коэффициент усиления антенны передатчика, G_{RX} – коэффициент усиления антенны приемника, $Loss$ – коэффициент потерь на трассе, NF – коэффициент шума приемника, Δ – шумовая полоса приемника.

3. Выбор сигнально-кодовой конструкции

При выборе сигнально-кодовой конструкции (СКК) основным критерием является обеспечение необходимого отношения энергии бита к плотности мощности шума (E_b/N_0) при заданной вероятности битовой ошибки (BER) на выходе декодера. Чаще всего для систем связи удовлетворительным является значение BER порядка 10^{-6} . Выбор СКК производится исходя из следующих соображений:

- 1) возможность использования помехоустойчивого способа модуляции с возможностью некогерентной обработки DBPSK;
- 2) наличие замираний и доплеровских сдвигов в канале предполагает использование кода, эффективного в условиях пакетных ошибок; к числу таких относится код Рида–Соломона (РС) [2].

В исследуемой системе выбрана DBPSK модуляция и код РС (63,32,6) с блоком в 192 информационных бита, длина блока – 63, скорость кода – 0.5.

Необходимое значение E_b/N_0 на входе демодулятора определяется в соответствии с требуемой вероятностью битовой ошибки.

В условиях сложного канала (многолучевость, доплеровский сдвиг частоты) отношение E_b/N_0 выбирается путем моделирования с учетом вышеизложенных факторов. На рис. 3 приведены энергетические кривые СКК DBPSK+РС (63,32,6) при наличии доплеровского сдвига частоты от 0 до 300 Гц.

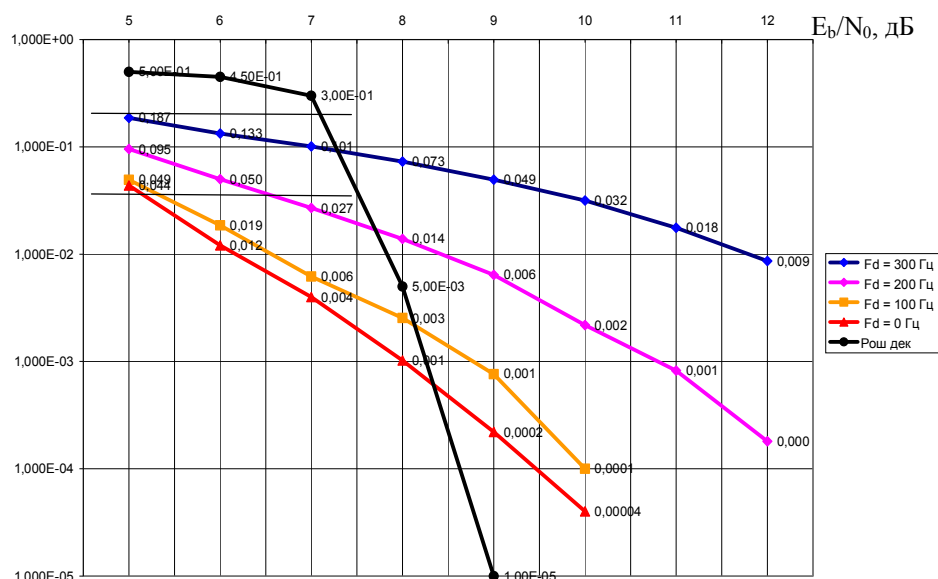


Рис. 3. Энергетические кривые СКК РС (63,32,6) + DBPSK в канале с доплеровским сдвигом несущей частоты

Согласно приведенным кривым для устойчивой связи необходимо обеспечить на входе демодулятора E_b/N_0 не менее 9 дБ. Выполненные в разд. 1, 2 расчеты легли в основу разработанных приемо-передающих блоков.

4. Структурная схема аппаратной части приемо-передающих модулей

На рис. 4 приведена структурная схема аппаратной части радиоприемного модуля. На рис. 5 приведена структурная схема аппаратной части радиопередающего модуля. В составе модулей присутствует плата цифровой обработки ЦОС 310.

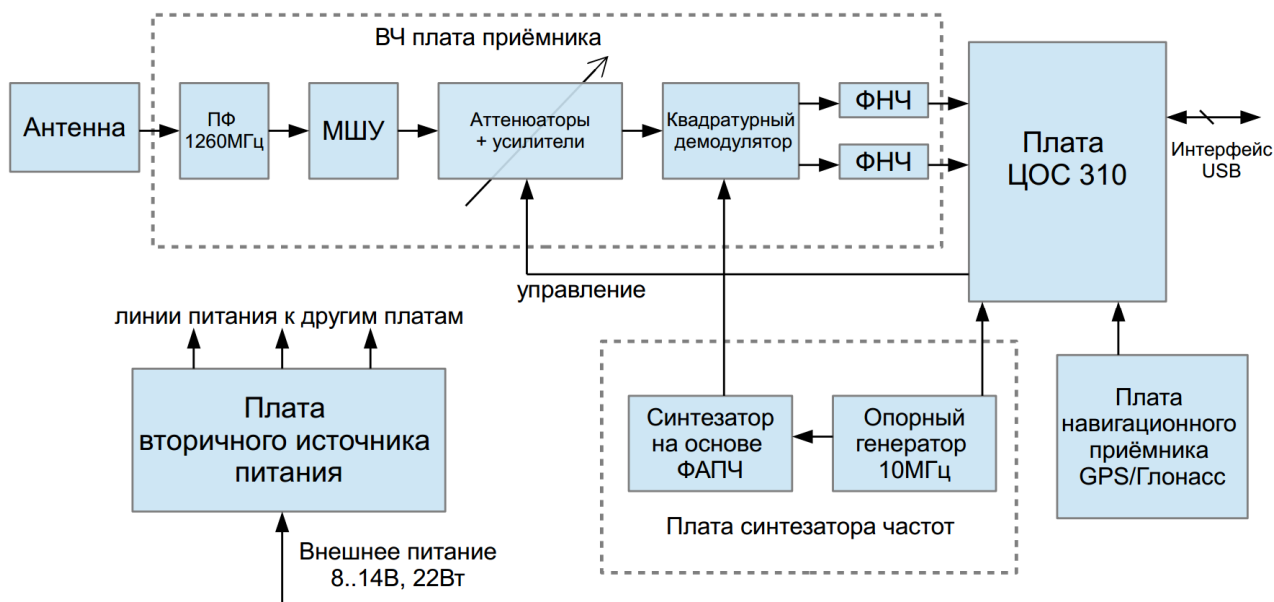


Рис. 4. Структурная схема аппаратной части радиоприемного модуля

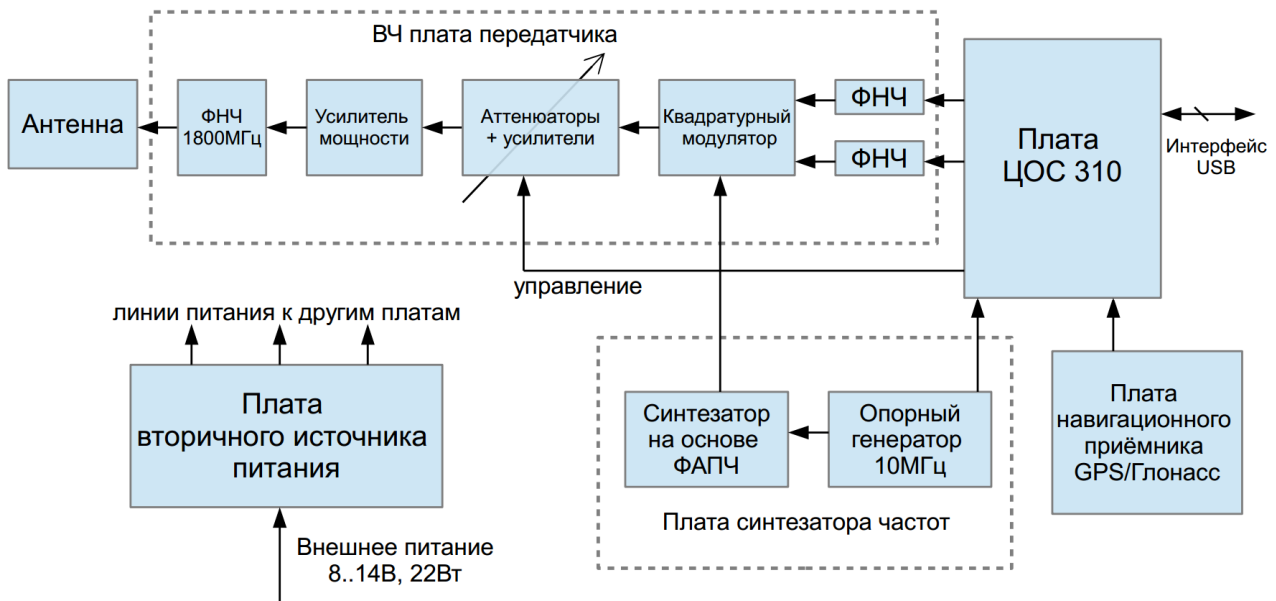
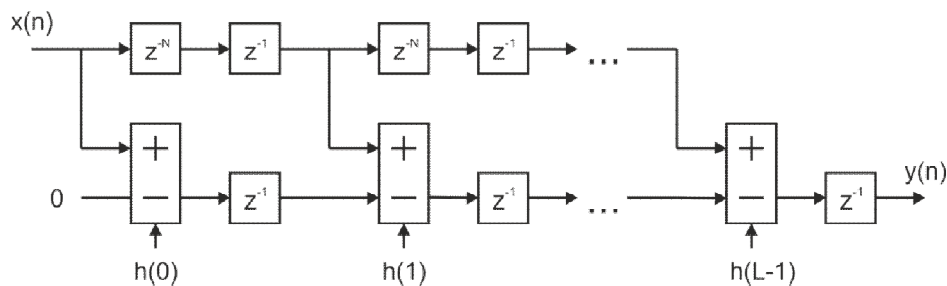


Рис. 5. Структурная схема аппаратной части радиопередающего модуля

Плата цифровой обработки квадратурных сигналов приемного блока выполняет функции АЦП сигналов с выхода квадратурных ФНЧ, дерасширителя на основе фильтров, согласованных с расширяющей ПСП, соответственно поиска максимума выходного сигнала, демодулятора DBPSK. Модуль цифровой обработки передающего блока выполняет функции модулятора DBPSK, расширения спектра и цифро-аналогового преобразования. В первом случае демодулированный поток через интерфейс платы ЦОС 310 поступает для вторичной обработки на ПК. Во втором случае через интерфейс платы ЦОС 310 квадратурные сигналы с выходов двух ЦАП поступают на входы ФНЧ квадратурного модулятора передающего тракта.

С целью оптимизации использования ресурсов ПЛИС реализован вариант двух вложенных ПСП (быстрая вложена в медленную). Термин быстрая и медленная ПСП связан с длительностью элемента ПСП. У медленной ПСП длительность элемента составляет порядка $(0.5/63)$ мс; у быстрой ПСП – $(0.5/63 \times 511)$ мс.

Наиболее ресурсоёмкими элементами приемника являются согласованные фильтры для быстрой и медленной ПСП. На рис. 6 приведена структурная схема фильтра, согласованного с ПСП $h(n)$, длины L . В случае быстрой ПСП $N = R$, в случае медленной ПСП $N = RL$. Фильтр реализуется на элементах задержки на N тактов (z^{-N}) и сумматорах.


 Рис. 6. Структурная схема фильтра, согласованного с ПСП $h(n)$, длины L

Максимальное значение на выходе согласованного фильтра соответствует границе ПСП, определяя тем самым границу символов. В реализованных алгоритмах согласованные

фильтры дополнены схемой поиска максимума, обеспечивающей помехоустойчивый поиск максимума в условиях малого отношения сигнал/шум. На основе связки согласованных фильтров и схемы поиска максимума решается задача символьной синхронизации передатчика и приемника.

Таким образом, реализована скрытная система передачи данных со следующими параметрами:

- полоса сигнала на несущей частоте 130 МГц;
- мощность передатчика 10 мВт;
- скорость передачи 1 кбит/с;
- рабочие частоты, L-диапазон;
- расстояние между передатчиком и приемником до 100 км;
- общая база двух вложенных ПСП – 32193;
- длительность элемента ПСП с учетом кодовой скорости 0.5 и информационной скорости порядка 1 Кбит/с около 15 нс;
- полоса пропускания квадратурных ФНЧ порядка 65 МГц.

При выбранной тактовой частоте 327.5 МГц полоса зоны Найквиста составляет 163.75 МГц, следовательно, полоса пропускания ФНЧ более чем в два раза превышает полосу квадратурных сигналов, что, в свою очередь, позволяет достаточно качественно выполнить квадратурную фильтрацию на входе АЦП приемного модуля и выходе ЦАП передающего модуля.

5. Экспериментальные исследования достижимости заявленных параметров

5.1. Исследования с помощью комплекса полунатурного моделирования (КПМ)

С помощью КПМ [3] было проведено моделирование работы системы в стационарном и мобильном радиоканалах. На выходе комплекса формируется физический сигнал в реальном масштабе времени, соответствующий сигналу, прошедшему по заданному радиоканалу [5].

В табл. 1 представлены значения вероятности ошибок на выходе демодулятора и декодера при различных значениях мощности сигнала на входе. Уменьшение мощности сигнала на входе можно трактовать как удаление передатчика от приемника на эквивалентное расстояние.

Таблица 1. Вероятности ошибок на выходе демодулятора и декодера

Мощность на входе приемника (дБм)	Ошибка демодулятора	Ошибка декодера
–69	Переполнение в блоке поиска максимума	
–70	3.96E-06	0
–80	2.47E-06	0
–90	4.21E-06	0
–110	2.47E-06	0
–128	3.59E-04	0
–129	1.37E-03	0
–130	5.26E-03	0
–131	0.0125964	0
–132	0.0255022	0.000125943
–133	0.0479141	0.0148856

Устойчивая работа приемника обеспечивается при входной мощности не более -70 дБм. Приемник обеспечивает безошибочную работу в диапазоне значений входной мощности от -131 до -70 дБм.

Для оценки функционирования системы в мобильном радиоканале с использованием КПМ были реализованы две модели радиоканала, их параметры приведены в табл. 2. Обе модели учитывали относительную скорость движения приемника и передатчика, равную 360 км/ч.

Таблица 2. Параметры моделей радиоканала

Параметр модели	модель 1	модель 2
Расстояние между передатчиком и приемником (км)	25	100
Относительная скорость движения (км/ч)	360	360
Мощность передатчика (мВт)	10	10
Высота приемной антенны над уровнем земли (м)	2	2
Высота передающей антенны над уровнем земли (м)	100	2000
Коэффициент усиления антенны	1	1

Результаты моделирования представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Результат моделирования для модели 1

Мощность прямого луча (дБм)	Средняя мощность отраженного луча (дБм)	Относительная задержка (нс)	Ошибка демодулятора	Ошибка декодера
-112	-118	0	0.006	0
-112	-117	0	0.016	0
-112	-116	0	0.020	$5.6e-5$

Таблица 4. Результат моделирования для модели 2

Мощность прямого луча (дБм)	Средняя мощность отраженного луча (дБм)	Относительная задержка (нс)	Ошибка демодулятора	Ошибка декодера
-124	-131	0	0.007	0
-124	-130	0	0.016	0
-124	-129	0	0.020	$5.3e-5$

Анализ результатов моделирования работы модема для рассматриваемых моделей радиоканалов показал, что безошибочная работа модема обеспечивается при отношении мощности прямого луча к средней мощности отраженного не менее 5 дБ.

Таким образом, с помощью КПМ показана достижимость дальности связи 100 км при заданной вероятности битовой ошибки не более 10^{-6} .

5.2. Эксперимент по исследованию достижимости дальности связи

Целью экспериментальных исследований было определение максимальной дальности приема сигнала.

Для проведения эксперимента была выбрана малолесистая местность. Точки расположения приёмника и передатчика были выбраны из условия прямой видимости. Расстояние между приёмником и передатчиком в ходе эксперимента составило 25.5 км.

Мощность передатчика в процессе эксперимента изменялась от 10 до -2 дБм с шагом 1 дБ, что соответствует изменению эквивалентного расстояния от 25.5 до 101.4 км.

В эксперименте была снята зависимость мощности на входе приемника от высоты передатчика с помощью летательного аппарата.

В качестве излучающей и принимающей антенн использовались несимметричные вибраторы.

Для эксперимента использовался четырехвинтовой летательный аппарат. Показания высоты передатчика были измерены с помощью встроенной телеметрии летательного аппарата. Результаты измерений приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты измерения мощности на входе приёмника

Высота подъёма передатчика, м	Мощность на входе приемника, дБмВт
100	-121.8
25	-121.8
20	-123.8
15	-123.8
12	-124.1
10	-126.2
8	-127.2
6	-126.9
5	-127
4	-129.5
3	-132

По результатам, приведённым в табл. 5, можно сделать следующие выводы:

- на высоте 3 м амплитуда с погрешностью 0.5 дБ соответствует предыдущим экспериментальным измерениям с данными антеннами (см. табл. 4);
- подъем антенны передатчика на высоту 25 м и выше приводит к увеличению мощности полезного сигнала на входе приёмника примерно на 10 дБ, что даёт хороший запас по мощности для уверенного приёма на расстоянии 100 км.

6. Заключение

Разработанная система скрытного управления подвижными объектами с использованием прямого расширения спектра и скоростью передачи данных 1 кбит/с позволяет достичь дальности связи 100 км при соблюдении условия скрытности радиоканала. За пределами охранной зоны, составляющей 10 км, скрытность составляет не менее -20 дБ. Скрытность радиоканала подтверждена экспериментально с применением штатной радиоаппаратуры РТР «Луч-МД» и «Кольчуга-М». При расстояниях между передатчиком и станциями РТР более 1 км сигнал передатчика не детектируется. Заявленные параметры радиоканала по дальности связи подтверждены экспериментально.

Литература

1. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес. 2010. № 5. С. 56–60.
2. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение, Второе издание, исправленное. Издательский дом Вильямс, 2007. 1104 с.

3. *Simon M.K., Omura J.K., Sholtz R.A., Levitt B.K.* Spread Spectrum Communication Handbook, Electronic Edition, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 2002. 1229 p.
4. *Кренив А. Н., Герасимов А. Б., Погребной Д. С., Селянская Е. А.* Патент на полезную модель №120300 «Комплекс полунатурного моделирования систем радиосвязи в канале с частотно-пространственно-временным рассеянием», Заявка: 2012110586/08 от 20.03.2012, опубл. 10.09.2014, бюл. №25.
5. *Герасимов А. Б., Киселева Ю. В., Кренив А. Н.* Патент на изобретение №2361438 «Способ имитации радиосигнала, отраженного от пространственно распределенной динамической радиофизической сцены, в реальном времени», Заявка: 2008122328/09, 02.06.2008, опубл. 10.04.2010, бюл. №10.

Статья поступила в редакцию 15.06.2016

Ботов Владимир Александрович

ассистент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ (150010, Ярославль, ул. Индустриальная, д. 19, корп. 2, кв. 10), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: bva@uniyar.ac.ru.

Казаков Леонид Николаевич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем ЯрГУ (150010, Ярославль, ул. Пирогова, д. 33, корпус 2, кв. 58), тел. (4852) 79-77-78, e-mail: kazakov@uniyar.ac.ru.

Селянская Екатерина Андреевна

ассистент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ (150064, Ярославль, ул. Строителей, д. 5, корп. 4, кв. 136), тел. (4852) 79-77-29, e-mail: eselyanskaya@mail.ru.

Соловьев Дмитрий Михайлович

инженер 1 категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ, (150049, Ярославль, ул. Рыбинская, д. 34, кв. 21), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: soldm89@gmail.com.

Experimental research of maximum achievable parameters of secret radio channel for moving objects control in multipath environment

Vladimir A. Botov, Leonid N. Kazakov, Catherine A. Selianskaia, Dmitry M. Soloviev

In this paper, maximum attainable parameters of a low-speed radio channel for moving objects control: data transfer rate, range, stealth in a multipath environment are investigated. The level of secrecy about -40 dB at distances up to 100 km at a bit error rate of 10^{-6} is achieved for the DQPSK modulation and Reed-Solomon code (63,32,6). In this case the power of the transmitter is 10 dBm and bitrate is 1000 bps. Spectrum spreading is implemented by a method based on two M-sequences. Attainability of the declared parameters is confirmed experimentally at HIL-system and in full-scale tests with unmanned aircraft. In full-scale tests of an experimental sample, a series of studies were developed for choosing the most effective antenna devices, with the marginal performance for transmitter and receiver located on the ground, and for a transmitter located on board. A series of studies of the experimental sample on specialized equipment approving the required parameters for stealth were performed. Established landfill equipment has recorded signals at distances not exceeding 1000 m.

Keywords: secret radio, maximum achievable parameters, multipath channel, Doppler spread, experimental research.