

Сверхширокополосные приёмопередатчики метрового и дециметрового диапазона на основе хаотических радиоимпульсов

А.С. Дмитриев¹, В.В. Ицков¹, М.М.Петросян¹, А.И. Рыжов¹

¹*Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7.
E-mail: chaos@cplire.ru*

*В работе исследуется вопрос создания сверхширокополосных (СШП) прямохаотических приёмопередатчиков в метровом и дециметровом диапазоне радиоволн. Оцениваются потенциальные возможности устройств, работающих в таком диапазоне. В экспериментальной части работы описывается разработка макетов приёмопередатчиков диапазона 200...450 МГц, их структура, техническая реализация и характеристики. Далее приводятся результаты лабораторных и полевых испытаний созданных макетов, продемонстрировавших дальности передачи более одного километра.
Ключевые слова: беспроводная связь, сверхширокополосный, прямохаотические системы связи, дециметровый диапазон.*

Ultrawideband VHF and UHF transceivers based on chaotic radio pulses

A.S. Dmitriev¹, V.V. Itskov¹, M.M. Petrosyan¹, A.I. Ryzhov¹

¹*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.*

*The problem of creation of ultrawideband (UWB) direct chaotic transceivers using VHF and UHF frequency bands is investigated. Potential possibilities of the devices working in these bands are estimated. In the experimental part of this work, the development of transceiver mockups operating in 200...450 MHz band is described, as well as their structure, technical implementation and characteristics. The results of laboratory and field experiments with the created mockups show that they are capable of data transmission exceeding one kilometer.
Keywords: wireless communication, ultrawideband, direct chaotic communication, VHF, UHF*

Введение

Первые исследования в области сверхширокополосной (СШП) беспроводной связи начались еще в 60-годы [1], однако активная работа по их развитию и стандартизации стартовала в начале 2000-х годов. Так появилась серия стандартов по СШП связи IEEE802.15.4a-2007, IEEE802.15.4-2011, IEEE802.15.6-201, IEEE802.15.4f-2012, IEEE802.15.4z-2020, ETSI стандарт EN 302 065-1-1-2016 с диапазоном скоростей передачи, от десятков кбит/с до 24 Мбит/с, позволяющая применять СШП решения для широкого круга прикладных задач.

Основой для последней модификации СШП стандарта - IEEE802.15.4z-2020 послужили исследования и разработки по созданию интегрированных полнофункциональных устройств [2], которые в значительной степени подготовили качественный скачок в области массового использования СШП средств связи.

Широкое применение СШП решений началось позднее, и первой большой компанией, внедрившей СШП чипы в свои продукты, стала Apple (чип Apple U1) [3]. За ней последовали компании Samsung [4], Xiaomi и другие. Все заявленные продукты используют технологию ультракоротких импульсов и серий таких импульсов в диапазоне частот от 3.1 до 10.6 ГГц [5]. При этом основной диапазон частот этих средств находится в районе 6 ГГц.

Работы по СШП связи в диапазонах частот ниже 3 ГГц в настоящее время, судя по публикациям, активно не ведутся. Хотя пионерские работы в области СШП связи, например, компании Multispectral Solutions, начинались именно в этих диапазонах [6].

Одним из альтернативных типов СШП сигналов являются прямохаотические сигналы. Схема передачи информации на их основе была предложена 20 лет назад [7, 8]. Первые эксперименты были проведены в 2000 году в диапазоне частот 900...1000 МГц и продемонстрировали работоспособность предложенного подхода.

Далее был проведен ряд работ по созданию СШП прямохаотических приёмопередатчиков в диапазоне 3...5 ГГц, которые могли функционировать как в режиме «точка-точка», так и в составе беспроводной сети. В основном исследования касались приёмопередатчиков малого радиуса действия (20...30 м), что определялось требованиями, накладываемыми на спектральную плотность мощности действующими спектральными масками для нелицензируемых СШП сигналов. Были приведены также разработки приёмопередатчиков повышенной дальности (до 200...240 метров) [8, 9].

В работе рассматривается вопрос о возможности создания СШП прямохаотических беспроводных средств связи в диапазоне 200...450 МГц, разрабатываются экспериментальные макеты таких сверхширокополосных приёмопередатчиков и проводятся их испытания.

Предварительные оценки показали, что, при сопоставимых пиковых мощностях передатчиков, в метровом и дециметровом диапазонах можно рассчитывать на значительное увеличение дальности связи по сравнению с дальностью связи в диапазоне 3-5 ГГц.

Основные характеристики разрабатываемого приёмопередатчика

Итак, в работе используется диапазон частот от 200 до 450 МГц (полоса 250 МГц), лежащий в средней части диапазона 100...1000 МГц и перекрывающийся с нулевым каналом стандартов IEEE 802.15.4. При этом выбранный диапазон не пересекается с лежащим выше частотным диапазоном телевизионных каналов.

Средняя частота используемого диапазона $F_{cp} = 325$ МГц. Несущий хаотический сигнал заполняет всю полосу 200...450 МГц. Коэффициент сверхширокополосности K составляет $K = \Delta F / F_{cp} = 77\%$.

Носителями информации в прямохаотических средствах связи (ПХСС) являются СШП хаотические радиоимпульсы. Цифровой двоичной информационной последовательности ставится в соответствие последовательность СШП хаотических радиоимпульсов. Передаваемый символ (бит) кодируется наличием/отсутствием радиоимпульса на предписанной временной позиции (ортогональная модуляция типа «включил-выключил»). Для борьбы с эффектами многолучевого распространения (межимпульсными помехами) в прямохаотических системах применяются защитные интервалы (см. рис. 1). Таким образом, основными параметрами сигнала на физическом уровне являются длительности: бита T_b , импульса T_n и защитного интервала T_z , где $T_b = T_n + T_z$.

Длительность бита T_b определяется максимальной скоростью передачи R на физическом уровне, $T_b = 1/R$. Пусть, например, длина хаотического радиоимпульса $T_n = 2$ мкс, и отношение длительности бита к длительности импульса – скважность сигнала $D = 8/3$. Тогда длительность бита $T_b = 5.333$ мкс, и скорость передачи $R = 188$ кбит/с. Длительности T_n и T_z определяют также энергетику канала связи в целом.

Для прямохаотической системы связи с указанными выше значениями параметров сигнала база сигнала составляет $B = 2 \cdot \Delta f \cdot T_n = 1000$, при этом для получения вероятностей ошибок на бит (BER) 10^{-3} , 10^{-4} и 10^{-5} требуются, соответственно,

следующие минимальные значения отношения энергии бита к спектральной плотности шума (E_b/N_0): 16.0 дБ, 18.5 дБ и 20.8 дБ соответственно.

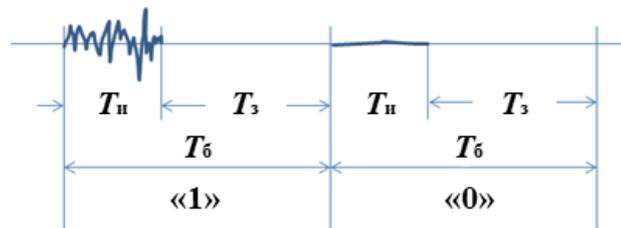


Рис. 1. Структура бита

Теоретическая оценка бюджета канала связи показывает, что для канала дальностью 1000 м линия связи имеет запас 25 дБ в свободном пространстве.

Описание приёмопередатчика

Структура сверхширокополосного (СШП) приёмопередатчика представлена на рис. 2а. Он включает в себя цифровую и аналоговую части. Цифровая часть осуществляет управление приёмопередатчиком в целом и реализована на основе микроконтроллера (МК) и ПЛИС. Через нее также осуществляется связь приёмопередатчика с акустическим датчиком (АД, состоит из микроконтроллера, операционного усилителя, АЦП и электрретного микрофона) и внешним устройством управления (персональным компьютером – ПК). В аналоговую часть входят передатчик и приемник. Передатчик состоит генератора хаоса с усилителем ($\Gamma+У$), а приемник из фильтров нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот, маломощного усилителя (МШУ), и логарифмического детектора (ЛД). Коммутация между передающим и принимающим каналами осуществляется через специальный радиочастотный ключ (К).

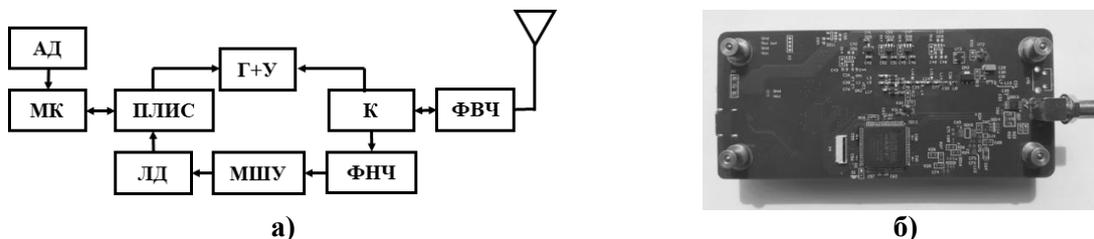


Рис. 2. Приёмопередатчик: а) – структура, б) – внешний вид

Внешний вид макета приёмопередатчика представлен на рис. 2б.

Передающий тракт устройства состоит из генератора хаоса, усилителя и акустического датчика.

Генератор хаоса реализован на основе кольцевой автоколебательной системы.

На основе разработанной структуры, электрической схемы и проведённого математического моделирования модели генератора с усилительным трактом был создан экспериментальный образец передающей части СШП приёмопередатчика. С ним проводились исследования по изменению режимов работы в зависимости от номиналов параметров электрической схемы. По результатам этих исследований были подобраны два режима, обеспечивающие формирование хаотического сигнала на выходе передающей части с мощностью $P = 20$ дБм и $P = 23 \dots 24$ дБм.

На рис. 3 показан спектр мощности хаотического сигнала на выходе усилительного тракта при питании устройства от аккумулятора (напряжение $V = 3.7$ В).

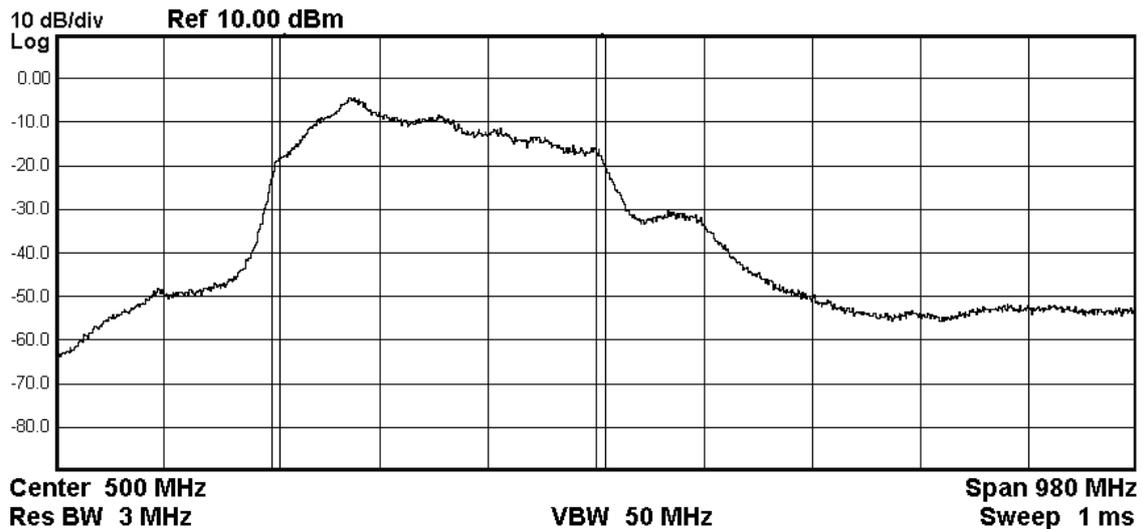


Рис.3. Спектр мощности сигнала на выходе усилительного тракта

Радиосигнал, принятый внешней антенной, поступает на СВЧ ключ, который коммутирует антенну с приемным трактом. Далее радиосигнал пропускается последовательно через фильтры верхних и нижних частот для выделения полезного сигнала и подавления внеполосных шумов. Затем сигнал поступает на вход МШУ, где производится его предварительное усиление в полосе частот приемника на 15 дБ при коэффициенте шума 1.5 дБ.

После этого сигнал подается на вход чувствительного элемента приемника, роль которого играет логарифмический детектор, обладающий чувствительностью -78 дБм при динамическом диапазоне 95 дБ и рабочем диапазоне частот 0 до 440 МГц. На выходе детектора формируется сигнал огибающей в логарифмическом масштабе.

Этот полезный сигнал, представляющий собой набор аналоговых импульсов с заданной амплитудой, поступает на компаратор, который осуществляет преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую.

Цифровая часть приёмопередатчика

В качестве процессора приёмопередатчика используется микроконтроллер семейства STM32 фирмы STMicroelectronics. Модуляция высокочастотного передаваемого сигнала и демодуляции принимаемого из эфира сигнала осуществляется при помощи ПЛИС семейства MAX5.

Для полноценной работы приёмопередатчика было разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет получать данные от акустического датчика, осуществлять их беспроводную передачу, а также посылать принятые данные на ПК. Само программное обеспечение состоит из программы для ПЛИС, а также программ для микроконтроллеров приёмопередатчика и акустического датчика.

Программа для ПЛИС позволяет модулировать и демодулировать радиоимпульсы, распознавать начало принимаемого пакета с данными, производить синхронизацию с принимаемым пакетом с данными.

Программа микроконтроллера акустического датчика управляет процессом оцифровывания аналогового сигнала с микрофона и кодирует полученную информацию для последующего декодирования на ПК.

Программное обеспечение микроконтроллера самого приёмопередатчика координирует работу всего устройства. Оно формирует пакеты с данными, посылает и

принимает данные из эфира, взаимодействует с ПК по USB интерфейсу и с акустическим датчиком по интерфейсу SPI.

Программное обеспечение ПК реализует следующие функции:

- визуальное представление режима работы приемопередатчика,
- моделирование возможности осуществления связи между приемопередатчиками на основе модели распространения сигнала с учётом расположения приемопередатчиков,
- визуализацию расположения приемопередатчиков в пространстве,
- поддержка двух режимов работы с устройствами: режим периодической инициализации удалённого приемопередатчика и режим передачи звуковых данных,
- воспроизведение звуковой информации, получаемой от приемопередатчика.

Испытания разработанных устройств в реальных условиях

Перед проведением полевых испытаний разработанных приемопередатчиков было необходимо провести ряд предварительных экспериментов по измерению реального динамического диапазона приёмника, а также работы всего приемопередатчика в идеализированных условиях (передача по кабелю).

Сначала был оценён динамический диапазон приемника, результаты измерений приведены на графике (рис. 4). Из графика видно, что в приемнике использован практически весь динамический диапазон логарифмического детектора, который составляет более 90 дБ. Изменение мощности на входе приемника на 10 дБ приводит к изменению уровня сигнала на выходе детектора на 250 мВ.

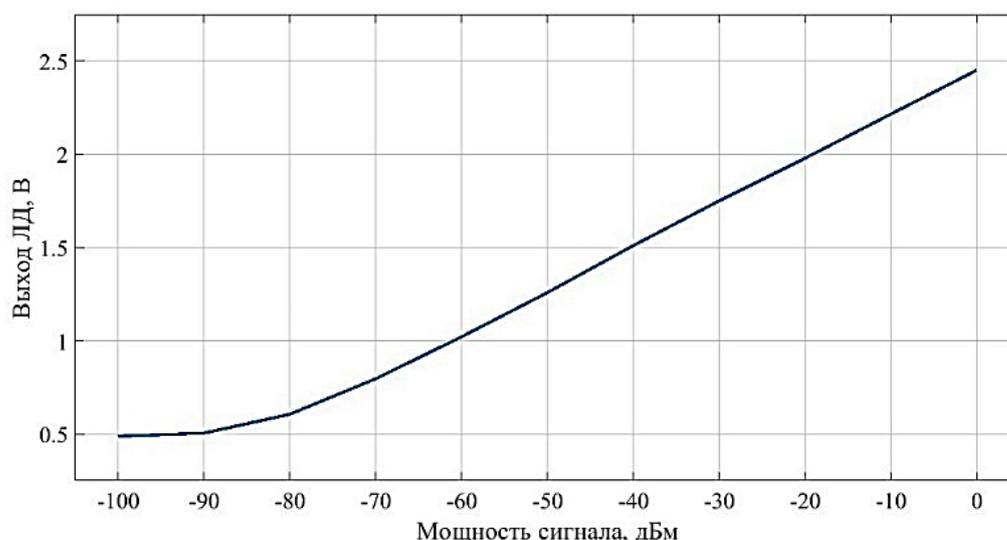


Рис.4. Напряжение на выходе логарифмического детектора в зависимости от мощности поступающего на вход сигнала.

Вторая группа экспериментов была посвящена определению вероятности ошибок в канале связи с кабелем для различных уровней затухания сигнала. Результаты этих измерений показали, что устойчивая связь наблюдается вплоть до затуханий на ~ 90 дБ, где вероятность ошибок не превышает 10^{-6} .

Данные вышеприведённых экспериментов показывают, что в целом приемная часть приемопередатчика функционально работоспособна как по чувствительности, так и по способности к демодуляции поступающих сигналов.

В описываемых ниже полевых испытаниях устройств использовались несколько типов антенн, среди которых:

- измерительная биконическая антенна П6-62 диапазона 0.3...1.0 ГГц (рис. 5а), далее антенна А1, размеры антенны 400x145x150 мм;
- гиперширокополосная биконическая антенна с рабочим диапазоном 0.15...21 ГГц, [10], размеры антенны 550x420x420 мм (рис. 5б), далее антенна А2;
- измерительная биконическая антенна VicoLOG, (рис. 5в), размеры антенны 350x160x140 мм, далее – антенна А3.

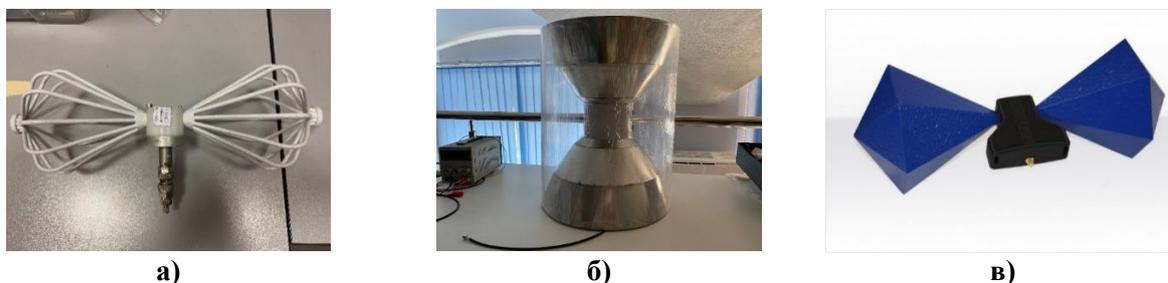


Рис. 5. Внешний вид антенн, использовавшихся в работе: а) – биконическая измерительная антенна П6-62, б) – гиперширокополосная биконическая антенна на диапазон 0.15...21 ГГц, в) – измерительная биконическая вибраторная антенна VicoLOG.

Было проведено несколько этапов полевых испытаний в условиях прямой видимости вдоль автомобильных дорог в разных условиях: город (бульвар с зелеными насаждениями), шоссе в пригороде большого города, территория с малоэтажной застройкой, испытательный полигон, шоссе в сельской местности.

Основной целью этих испытаний было определение реальной дальности приема и передачи системы связи в зависимости от условий местности, а также типов использовавшихся антенн.

Эксперименты в городских условиях носили предварительный характер.

Эксперименты на полигоне проводились с антеннами А1 и А2, имеющими высокую эффективность в рабочем диапазоне частот приемопередатчиков. При измерениях была достигнута дальность передачи 550...570 метров. При этом было обнаружено, что максимальная дальность передачи существенно отличается для вертикального и горизонтального расположения антенн.

Проведенный анализ ситуации указал на некоторые дополнительные возможности повышения дальности связи, относящиеся к конструкции приемопередатчиков, а также на ограничения, связанные с электромагнитной обстановкой.

Эти выводы были учтены в первой серии экспериментов в окрестностях г. Звенигорода, где использовались антенны А1 и А3. Там уровень внешних шумов оказался примерно на 2 дБ ниже, чем на полигоне. Это привело к значительному уменьшению вероятностей ошибок и улучшению качества связи, однако дальность связи в первой серии экспериментов по сравнению с полигонными испытаниями практически не увеличилась.

Было высказано предположение, что ограничение по дальности определяется тем, что реально мы работаем не в свободном пространстве, а вблизи поверхности земли. В этом случае дальность действия системы должна оцениваться при помощи двухлучевой модели распространения, в соответствии с которой высота расположения приёмной и передающих антенн сильно сказывается на дальности системы связи. В первой серии экспериментов высота расположения приёмника и передатчика составляла 1.5 м. Если изменить высоту антенн приёмника и передатчика в 2 раза с 1.5 м до 3 м, то бюджет канала связи согласно двулучевой модели увеличивается на 6 дБ, что должно приводить к существенному изменению максимальной дальности связи.

Для проверки этого предположения во второй серии измерений высота расположения антенн была увеличена до 3 м, в результате чего экспериментально зафиксированная дальность связи оказалась близкой к 1500 метрам.

Выводы

Целью работы была проверка работоспособности концепции сверхширокополосной прямохаотической связи в метровом и дециметровом диапазонах. Задача решалась как теоретически, так и экспериментально путем разработки, изготовления и испытаний макетов СШП приемопередатчиков со следующими расчетными характеристиками:

- частотный диапазон 200...450 МГц;
- полоса частот до 250 МГц;
- физическая скорость передачи 188 кбит/с;
- выходная мощность в импульсе до 100...250 мВт;
- дальность действия – до 1000 м при выходной пиковой мощности передатчика 100 мВт.

В результате проведенных исследований и разработок созданы экспериментальные макеты сверхширокополосной прямохаотической связи в диапазоне 200...450 МГц, характеристики которых в целом соответствуют предварительным теоретическим оценкам.

Тем самым теоретически и экспериментально показана возможность практической реализации сверхширокополосных прямохаотических средств связи в метровом и дециметровом диапазоне длин волн.

Литература

1. Fontana R.J. A Brief History of UWB Communications. Germantown: Multispectral Solutions, Inc. 2000.<https://ru.scribd.com/document/92157802/A-Brief-History-of-UWB-Communications>
2. Официальный сайт Decawave, документация на модуль DWM1000. <https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dwm1000-datasheet-v1.3.pdf>
3. Официальный сайт Apple для разработчиков, информация о применении СШП технологии в устройствах Apple. <https://developer.apple.com/nearby-interaction/>
4. Kim K. J. // Samsung Newsroom. Suwon-si: Samsung Electronics Ltd., 12. Oct. 2020. <https://news.samsung.com/global/samsung-expects-uwband-to-be-one-of-the-next-big-wireless-technologies>
5. Coppens D., De Poorter E., Shahid A. et al. An Overview of Ultra-WideBand (UWB) Standards (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability. Aspects and Future Research Directions. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02190>
6. Fontana R. J. Recent Trends in Ultra Wideband Communications Systems. Germantown: Multispectral Solutions Inc., 2004. <https://pdfs.semanticscholar.org/97f0/b8bce6050ac3a36cd359426e24275e4b67cb.pdf>
7. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для средств связи. М.: Физматлит, 2002.
8. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой. М.: Техносфера, 2019.
9. Дмитриев А.С., Попов М.Г., Рыжов А.И. Повышение дальности действия сверхширокополосных прямохаотических средств связи // РЭ. 2020. Т. 65. №9. С. 902.
10. Калашин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А. Исследование характеристик полуконической антенны в широкой полосе частот // РЭ. 2011. Т. 56. № 9. С. 1094.