

УДК 621.391

Сверхширокополосная радиосвязь на основе хаотических радиоимпульсов в метровом и дециметровом диапазоне

Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Ицков В. В.,
Петросян М. М., Рыжов А. И.

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, 11/7, г. Москва, 125009, Российская Федерация
chaos@cplire.ru*

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: *Анализируется состояние вопроса развития сверхширокополосной (СШП) радиосвязи в метровом и дециметровом диапазоне, в том числе прямохаотической беспроводной связи, показана его актуальность. Исследуется вопрос создания сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиков в метровом и дециметровом диапазоне радиоволн как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения практической реализации. Оцениваются потенциальные возможности устройств, работающих в таком диапазоне, касающиеся скорости работы приемопередатчика, дальности связи, энергопотребления, вероятности ошибок, приводится расчет бюджета канала связи. В экспериментальной части работы описывается разработка макетов приемопередатчиков диапазона 200—450 МГц, их структура, техническая реализация и характеристики. Приводятся результаты лабораторных и полевых испытаний созданных макетов, продемонстрировавших дальности передачи более одного километра.*

Ключевые слова: *беспроводная связь, сверхширокополосный, прямохаотические системы связи, дециметровый диапазон.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Сверхширокополосная радиосвязь на основе хаотических радиоимпульсов в метровом и дециметровом диапазоне / А. С. Дмитриев [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 24—44.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Сверхширокополосная радиосвязь на основе хаотических радиоимпульсов в метровом и дециметровом диапазоне / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, В. В. Ицков [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 24—44.

1. Введение

Первые исследования в области сверхширокополосной (СШП) беспроводной связи начались еще в 60-е годы [1], однако активная работа по их развитию и стандартизации стартовала в начале 2000-х годов. Так появилась серия стандартов по СШП связи *IEEE 802.15.4a-2007*, *IEEE 802.15.4-2011*, *IEEE 802.15.6-2011*, *IEEE 802.15.4f-2012*, *IEEE 802.15.4z-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 — *IEEE 802.15.4z-2020* послужили исследования и разработки по созданию интегрированных полнофункциональных устройств¹, которые в значительной степени подготовили качественный скачок в области массового использования СШП средств связи.

За прошедшие годы несколько раз делались попытки создавать различные альянсы для продвижения СШП-технологий в практическую плоскость, но только в 2018 году был создан жизнеспособный *UWB alliance*, по инициативе которого стандарт *IEEE 802.15.4* был модифицирован в стандарт *IEEE 802.15.4z*. После этого, наконец, началось широкое применение СШП решений. Первой большой компанией, внедрившей СШП чипы в свои продукты, стала *Apple* (чип *Apple U1*²). За ней последовали компании *Samsung* [2], *Xiaomi* и другие. Все заявленные продукты используют технологию ультракоротких импульсов и серий таких импульсов в диапазоне частот от 3.1 до 10.6 ГГц [3]. 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*, начались именно в этих диапазонах [4].

2. Прямохаотическая беспроводная связь

Ультракороткие импульсы и серии таких импульсов являются лишь одним из возможных типов сигналов со сверхширокополосным спектром, пригодных для применения в СШП средствах связи. Одним из альтернативных типов СШП сигналов являются прямохаотические сигналы. Схема передачи информации на их основе была предложена 20 лет назад [5, 6].

¹ URL: <https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dwm1000-datasheet-v1.3.pdf>

² URL: <https://support.apple.com/guide/security/ultra-wideband-security-sec1e6108efd/web>

Первые эксперименты были проведены в 2000 году в диапазоне частот 900—1000 МГц и продемонстрировали работоспособность предложенного подхода. В нем были заложены две «изюминки», которые позволили реализовать использование хаотических сигналов в системах беспроводной связи. Этими «изюминками» были: формирование на передающей стороне хаотического сигнала непосредственно в радио- или СВЧ диапазоне и применение простейшей схемы модуляции «включил — выключил». В некотором смысле прямым следствием этих идей стало использование импульсных хаотических сигналов, а не непрерывных, и некогерентный энергетический прием хаотических сигналов с помощью детектора огибающей.

В 2001 году экспериментально была продемонстрирована работоспособность предложенного решения не только для широкополосных, но и для сверхширокополосных (СШП) хаотических сигналов. Для этого был разработан и реализован экспериментальный макет с полосой частот хаотического сигнала от 500 до 3500 МГц, на котором была экспериментально показана возможность передачи данных при помощи беспроводных средств связи на основе хаотических сигналов со скоростями до 500 Мбит/с.

В период с 2007 года по настоящее время был проведен ряд НИР и НИОКР, в результате которых было создано более 10 вариантов приемопередатчиков для связи как в режиме «точка — точка», так и в составе беспроводных локальных сетей связи и сенсорных сетей. В качестве рабочего диапазона частот в основном использовался диапазон 3—5 ГГц. Эти исследования и разработки касались приемопередатчиков 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 приемопередатчиков повышенной дальности (до 200—240 метров) [6, 7].

В настоящей статье ставится и положительно решается вопрос о возможности создания СШП прямохаотических беспроводных средств связи в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. С этой целью: оцениваются потенциальные характеристики средств прямохаотической связи в частотном диапазоне 100—1000 МГц, разрабатываются экспериментальные макеты сверхширокополосных приемопередатчиков в полосе частот, входящей в этот диапазон, и проводятся испытания созданных устройств в лабораторных и полевых условиях.

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.

3. Особенности рассматриваемого частотного диапазона

Рассматриваемый частотный диапазон обладает следующими особенностями.

Во-первых, частотный диапазон ниже 1000 МГц упоминается только в американской маске и отсутствует в других спектральных масках для нелицензируемого использования СШП сигналов. Спектральная маска для нелицензируемых сверхширокополосных сигналов в США допускает использование СШП сигналов в диапазоне ниже 1 ГГц с той же спектральной плотностью, что и в области частот 3.1—10.6 ГГц, а именно -41.3 дБм/МГц.

При этом в стандартах серии *IEEE* 802.15.4 предусмотрен нулевой канал с полосой 500 МГц и центральной частотой около 500 МГц.

Во-вторых, при использовании данного частотного диапазона ожидаемая дальность действия таких систем в свободном пространстве при прочих равных условиях больше, чем при работе в диапазоне частот 3.0—10.6 ГГц. Это связано с тем, что для ненаправленных антенн эффективная площадь антенны пропорциональна квадрату длины волны, и при понижении частоты увеличивается энергия, собираемая антенной. Последнее, свою очередь, приводит к увеличению дальности передачи.

В-третьих, меняется ситуация с межсимвольной интерференцией. Средства связи дециметрового диапазона, работающие на значительно больших расстояниях, чем системы СШП связи диапазона 3.1—10.6 ГГц, находятся в других условиях распространения радиосигнала. Точных данных на этот счет мало, но можно предположить, что, с одной стороны, время запаздывания переотраженных лучей будет расти линейно с ростом расстояния между передатчиком и приемником, что требует соответствующего увеличения длительности защитного интервала. С другой стороны, число переотраженных лучей, поступающих в приемник, скорее всего, будет значительно меньше, чем в системах малого радиуса действия, работающих в среде, насыщенной различными препятствиями. Можно ожидать, что эти факторы будут в какой-то степени компенсировать друг друга. При разработке макетов приемопередатчиков и программы испытаний мы исходили из максимальной оценки времени задержки прихода прямых лучей при выборе защитных интервалов.

В-четвертых, для этого диапазона отсутствуют общепринятые модели распространения сигналов. При работе над стандартами в области СШП связи для диапазона 3.1—10.6 ГГц был разработан ряд моделей для различных условий применения радиопередающих средств, что позволяет единообразно оценивать различные предлагаемые решения не только с

точки зрения межсимвольной интерференции, но и, например, по скорости затухания с увеличением расстояния. Для рассматриваемого диапазона таких моделей нет, и при проведении теоретических оценок необходимо использовать частные модели, которые были наработаны при создании и эксплуатации узкополосных средств связи, так же как эмпирический опыт, полученный при применении ранее разработанных средств.

В-пятых, необходимо учитывать рельеф местности и закономерности распространения радиоволн. Одной из возможностей учета условий распространения является использование двухлучевой модели, которая позволяет значительно уточнить оценку максимальной дальности работы средств связи [8].

Наконец, в-шестых, еще одним важным моментом, который должен учитываться как при выборе характеристики средств связи, так и при их эксплуатации, является необходимость учета реального уровня шумовых помех естественного и искусственного происхождения. Как оказалось, в рассматриваемом диапазоне частот этот уровень претерпевает значительные изменения в зависимости от времени суток и местоположения аппаратуры, что серьезно сказывается на качестве передачи и ее дальности.

При теоретических и экспериментальных исследованиях 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 $K = \Delta F / F_{cp} = 250 \text{ МГц} / 325 \text{ МГц} = 77 \%$.

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_6 , импульса T_n и защитного интервала T_3 , где $T_6 = T_n + T_3$.

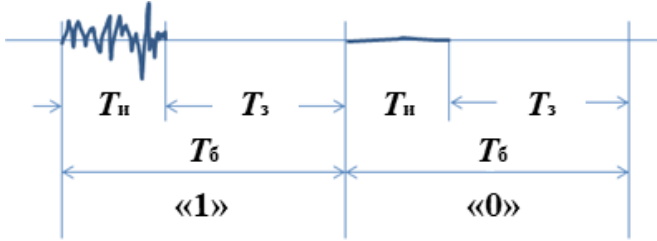


Рис. 1. Структура бита.

Fig. 1. Structure of the bit

Длительность бита T_6 определяется максимальной скоростью передачи R на физическом уровне, $T_6 = 1/R$. Пусть, например, длина хаотического радиоимпульса $T_{п} = 2$ мкс, и отношение длительности бита к длительности импульса – скважность сигнала $D = 8/3$. Тогда длительность бита $T_6 = 5.333$ мкс, и скорость передачи $R = 188$ кбит/с. Длительности $T_{п}$ и T_3 определяют также энергетику канала связи в целом.

4. Характеристики приемопередатчиков в канале с белым шумом

Для прямохаотической системы связи с указанными выше значениями параметров сигнала база сигнала составляет $B = 2 \cdot \Delta f \cdot T_{п} = 1000$ (коэффициент процессинга $K = \Delta f \cdot T_{п} = 500$), 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_6/N_0): 16.0 дБ, 18.5 дБ и 20.8 дБ.

В табл. 1 приводятся результаты расчетов энергетического баланса канала связи для принятых параметров передачи и структуры сигнала. Расчеты выполнены для свободного пространства и для двухлучевой модели распространения радиосигнала над плоской землей. Для расчета ослабления радиосигнала (*Path Loss*) при распространении над землей использовалась формула Введенского [8]:

$$E_{п} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} = E_{п0} \cdot V, \quad (1)$$

где $E_{п}$ – амплитуда электрического поля в точке приема, $E_{п0} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r}$ — амплитуда электрического поля в точке приема в свободном пространстве, а

$$V = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}, \quad (2)$$

— множитель, связанный с интерференцией прямого и отраженного лучей. Интерференционный множитель V дает дополнительное ослабление,

которое следует учитывать, чтобы получить более реалистичную оценку дальности радиосистемы. В нашем случае для расчетов по мощности для оценки дополнительного ослабления необходимо брать $|V|^2$.

Высота расположения антенн передатчика и приемника при расчетах предполагалась одинаковой: $h_1 = h_2 = 3$ м.

Таблица 1. Расчет канала связи.

Table 1. Communication channel calculation

Параметр	Свободное пространство	2-лучевая модель
Скорость передачи R	188 Кбит/с	188 Кбит/с
Длительность импульса τ	2000 нс	2000 нс
Мощность передачи (в импульсе) $P_{\text{пер}}$	20 дБм	20 дБм
Средняя мощность передачи с учетом скважности $D = 8/3$ при ортогональном кодировании, $P_{\text{пер}} = P_{\text{пер}}/2D$	13 дБм	13 дБм
Усиление передающей антенны $G_{\text{пер}}$	0 дБи	0 дБи
Высота передающей антенны h_1		3 м
Граница действия интерф. фактора		100 м
Центральная частота $f_{\text{ц}} = \sqrt{f_{\text{мин}}f_{\text{макс}}}$	325 МГц	325 МГц
Ослабление (Path Loss) на 1 м $L_1 = 20\lg(4\pi f_{\text{ц}}/c)$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с	22.0 дБ	22.0 дБ
Ослабление на $d = 1000$ м $L_2 = 10\lg(d^2)$	60 дБ	60 дБ
Интерференционный множитель $V = 20\lg(4\pi h_1 h_2 / \lambda d)$		-18.9 дБ
Усиление приемной антенны $G_{\text{пр}}$	0 дБи	0 дБи
Высота приемной антенны h_2		3 м
Мощность сигнала на входе приемника (своб. пр-во) $P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - L_1 - L_2 + V$ (дБ)	-69 дБм	
Мощность сигнала на входе приемника (2-луч. модель) $P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - L_1 - L_2 + V$ (дБ)		-88 дБм
Средняя мощность шума в полосе сигнала $N = -174 + 10\lg(1/\tau D)$	-121 дБм	-121 дБм
Шум приемника $F_{\text{ш}}$	3 дБ	3 дБ
Полная средняя мощность шума на бит $P_{\text{ш}} = N + F_{\text{ш}}$	-114 дБм	-114 дБм
Минимальное значение E_b/N_0 (BER = 10^{-5})	20.8 дБ	20.8 дБ
Потери в аппаратуре I	3 дБ	3 дБ
Запас канала (Link Margin) $M = P_{\text{пр}} - P_{\text{ш}} - (E_b/N_0)_{\text{мин}} - I$	25 дБ	6 дБ
Мин. чувствительность приемника $S = N + (E_b/N_0)_{\text{мин}} + F_{\text{ш}} + I$	-90 дБм	-90 дБм

Из табл. 1 следует, что для канала дальностью 1000 м линия связи имеет запас 25 дБ в свободном пространстве, и 6 дБ в рамках двухлучевой модели распространения радиосигнала.

5. Приемопередатчик

Структура сверхширокополосного (СШП) приемопередатчика представлена на рис. 2. Он включает в себя цифровую и аналоговую части. Цифровая часть осуществляет управление приемопередатчиком в целом и реализована на основе микроконтроллера (МК) 1 и ПЛИС 2. Через нее также осуществляется связь приемопередатчика с акустическим датчиком 3 (состоит из микроконтроллера, операционного усилителя, АЦП и электретного микрофона) и внешним устройством управления (персональным компьютером ПК). В аналоговую часть входят передатчик и приемник. Передатчик состоит из генератора хаоса с усилителем 4, а приемник — из фильтров нижних (ФНЧ) 5 и верхних (ФВЧ) частот 6, малошумящего усилителя (МШУ) 7 и логарифмического детектора (ЛД) 8. Коммутация между передающим и принимающим каналами осуществляется через специальный радиочастотный ключ 9.

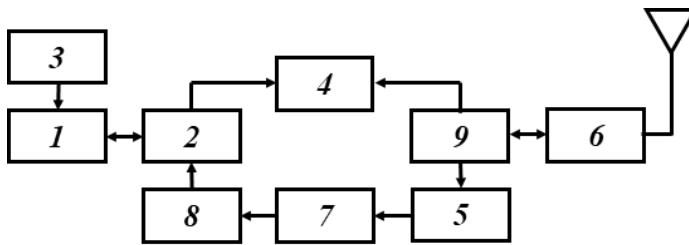


Рис. 2. Структура приемопередатчика: 1 — микроконтроллер; 2 — ПЛИС; 3 — акустический датчик; 4 — генератор хаоса с усилителем; 5 — фильтр нижних частот; 6 — фильтр верхних частот; 7 — малошумящий усилитель; 8 — логарифмический детектор; 9 — радиочастотный ключ.

Fig. 2. The structure of the transceiver: 1 – microcontroller; 2 – FPGA; 3 – acoustic sensor; 4 – chaos generator with amplifier; 5 – low-pass filter; 6 – high-pass filter; 7 – low noise amplifier; 8 – logarithmic detector; 9 – radio frequency key

Внешний вид макета приемопередатчика представлен на рис. 3.

5.1 Передающий тракт

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

Генератор хаоса реализован на основе кольцевой автоколебательной системы. За основу электрической схемы генератора была взята схема генератора хаотических колебаний с одним активным элементом (транзистором) и фильтрующей цепью обратной связи, хорошо зарекомендовавшая себя на частотах выше 500 МГц [9].

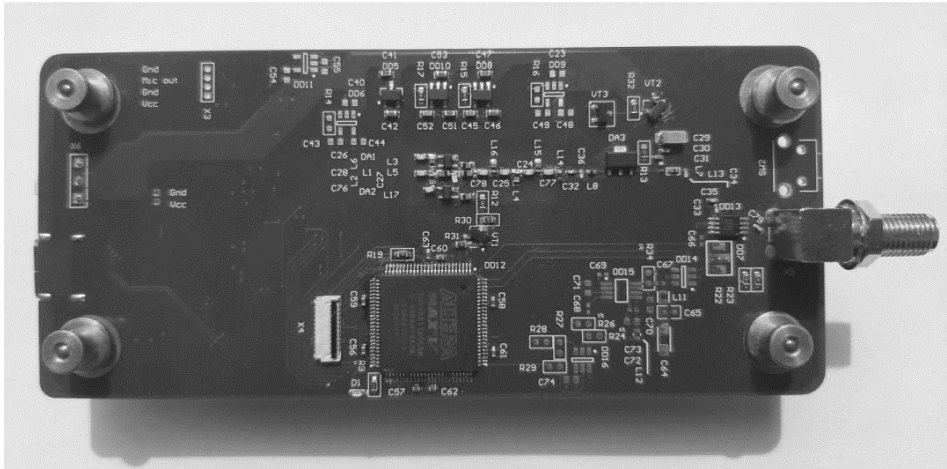


Рис. 3. Макет передающей части СШП приемопередатчика системы связи.

Fig. 3. Model of the transmitting part of the UWB transceiver of the communication system

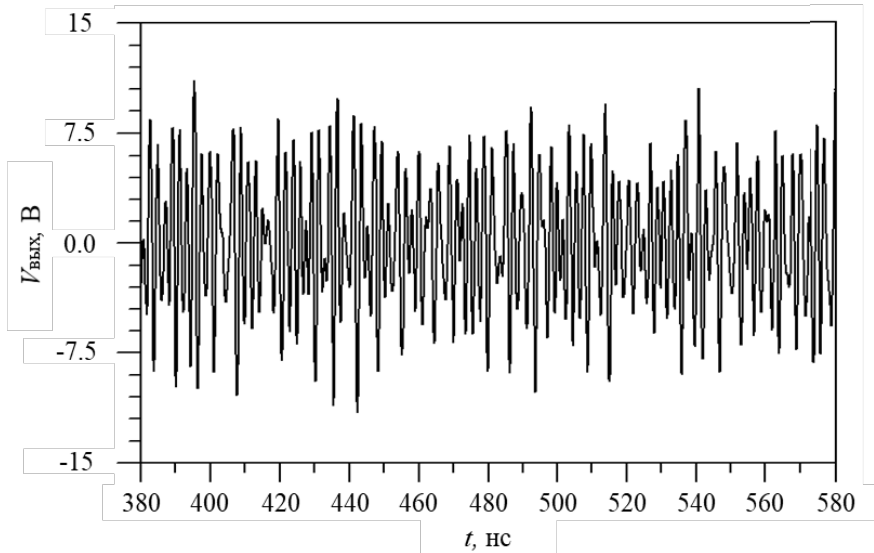
Однако предварительные исследования показали, что спектр мощности генератора, выполненного по такой схеме для частот 200—450 МГц, при используемой элементной базе имеет высокую неравномерность внутри полосы частот, и от этой схемы было решено отказаться. В качестве альтернативной была предложена и разработана схема генератора с двумя транзисторными активными элементами.

На рис. 4 приведены примеры временной реализации и спектра сигнала модели генератора, полученные в ходе моделирования. Управляющим (бифуркационным) параметром является напряжение питания генератора.

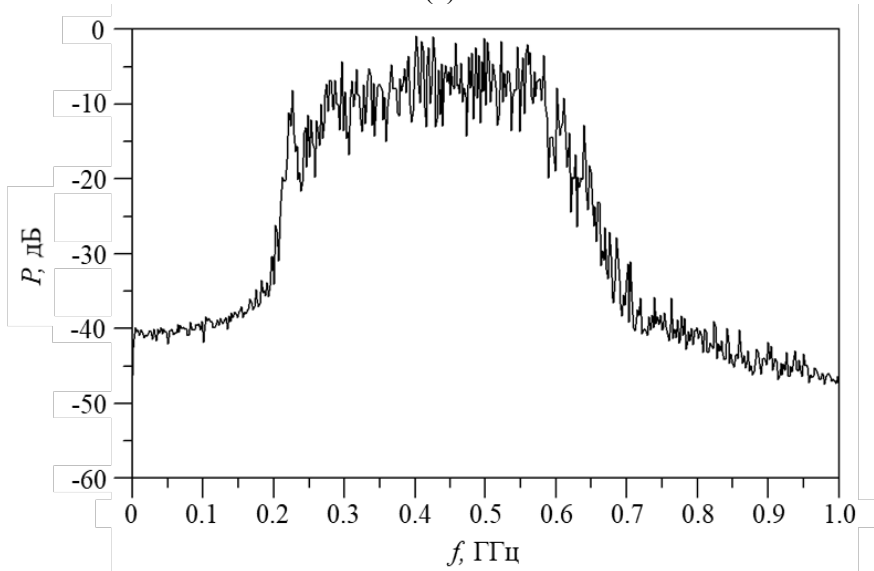
Усилитель в передающем тракте на частоте 400 МГц имеет усиление 21 дБ при уровне компрессии 1 дБ.

Модель генератора с усилителем обеспечивает возбуждение хаотических колебаний в диапазоне частот $F = 200—450$ МГц (рис. 4б). Ширина полосы частот СШП хаотических колебаний составила $\Delta F = 250$ МГц.

На основе структуры, электрической схемы и модели генератора с усилительным трактом был создан экспериментальный образец передающей части СШП приемопередатчика. 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 $P = 23—24$ дБм.



(a)



(б)

Рис. 4. Модель разработанного хаотического генератора: фрагмент временной реализации сигнала генератора (а); спектр мощности сигнала генератора (б).

Fig. 4. Model of the developed chaotic generator: a fragment of the temporal implementation of the generator signal (a); generator signal power spectrum (б)

На рис. 5 показан спектр мощности хаотического сигнала на выходе усилительного тракта при питании устройства от аккумулятора (напряжение $V = 3.7$ В).

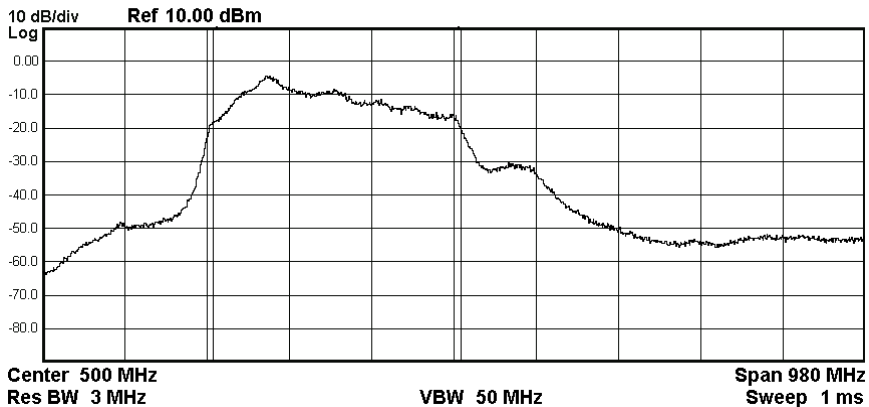


Рис. 5. Спектр мощности сигнала на выходе усилительного тракта.

Fig. 5. Signal power spectrum at the output of the amplifying path

5.2. Приемный тракт

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 AD8310, 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.

5.3. Цифровая часть и программное обеспечение приемопередатчика

В качестве процессора приемопередатчика выбран микроконтроллер семейства *STM32* фирмы *STMicroelectronics*. Он обладает необходимыми интерфейсами ввода-вывода (*SPI* для взаимодействия с ПЛИС и акустиче-

ским датчиком, *USB* для взаимодействия с ПК). Модуляция высокочастотного передаваемого сигнала и демодуляции принимаемого из эфира сигнала осуществляется при помощи ПЛИС семейства *MAX5*.

Для полноценной работы приемопередатчика необходимо специальное программное обеспечение, которое позволяет снимать данные с акустического датчика, осуществлять беспроводную передачу данных и посылать принятые данные на ПК. Само программное обеспечение состоит из программы для ПЛИС, а также программ для микроконтроллеров приемопередатчика 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 приемопередатчика 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*.

5.4. Программное обеспечение персонального компьютера

Программное обеспечение ПК реализует следующие функции:

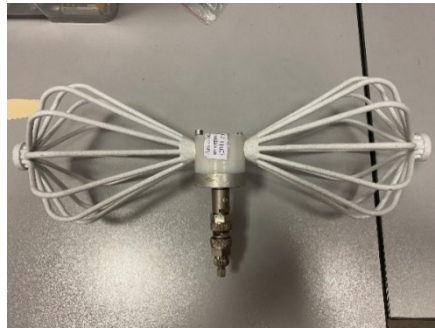
- визуальное представление режима работы приемопередатчика,
- моделирование возможности осуществления связи между приемопередатчиками на основе модели распространения сигнала с учетом расположения приемопередатчиков,
 - визуализацию расположения приемопередатчиков в пространстве,
 - два режима работы с устройствами: режим периодической инициализации удаленного приемопередатчика и режим передачи звуковых данных (дежурный и рабочий режим соответственно),
 - воспроизведение звуковой информации, получаемой от приемопередатчика.

5.5. Антенны

В работе использовались несколько типов антенн, среди которых:

- измерительная биконическая антенна П6-62 диапазона 0.3—1.0 ГГц (рис. 6а), далее антенна А1, размеры антенны 400×145×150 мм;
- гиперширокополосная биконическая антенна с рабочим диапазоном 0.15—21 ГГц, [10], размеры антенны 550×420×420 мм (рис. 6б), далее — антенна А2;

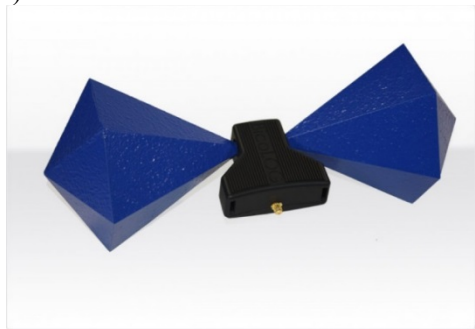
— измерительная биконическая антенна VicoLOG, (рис. 6в), размеры антенны 350×160×140 мм, далее — антенна АЗ.



(а)



(б)



(в)

Рис. 6. Внешний вид антенн, использовавшихся в работе: биконическая измерительная антенна П6-62 (а); гиперширокополосная биконическая антенна на диапазон 0.15—21 ГГц (б); измерительная биконическая вибраторная антенна VicoLOG (в).

Fig. 6. Appearance of the antennas used in the work: П6-62 biconical measuring antenna (а); hyper-wideband biconical antenna for the range of 0.15–21 GHz (б); measuring biconical vibrator antenna VicoLOG (с)

6. Лабораторные измерения и полевые испытания

6.1 Лабораторные измерения

При проведении первой группы измерений оценивался динамический диапазон приемника. Результаты проведенных измерений приведены на графике (рис. 7).

Из графика видно, что в приемнике использован почти 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.

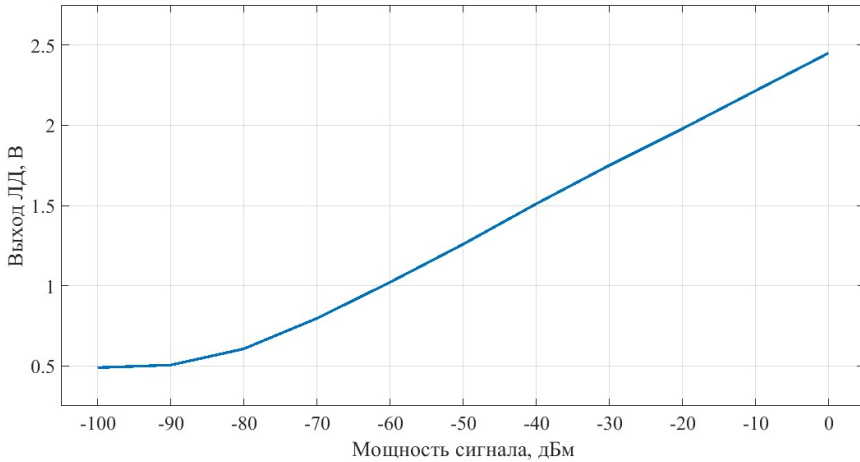


Рис. 7. Уровень сигнала на выходе ЛД в зависимости от мощности поступающего на вход приемника постоянно РЧ сигнала.

Fig. 7. The signal level at the output of the LD, depending on the power of the constant RF signal arriving at the input of the receiver

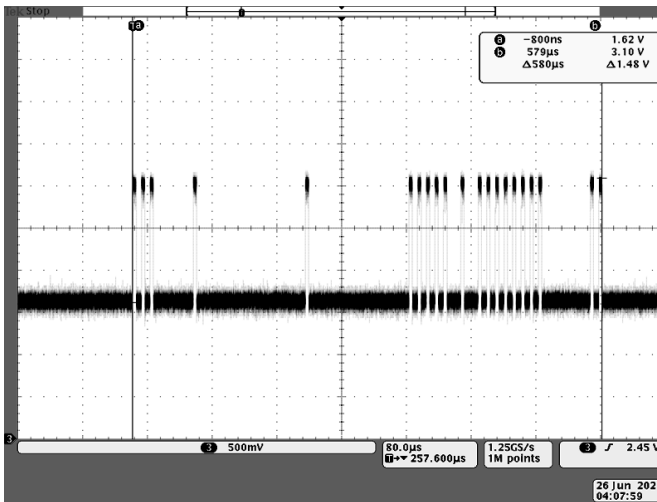


Рис. 8. Вид одного пакета данных, полученный после логарифмического детектора в низкочастотной части приемного тракта. Масштаб: в одной летке 80 мкс по горизонтальной оси и 500 мВ по вертикальной.

Fig. 8. View of one data packet received after the logarithmic detector in the low-frequency part of the receiving path. Scale: in one notch, 80 μ s along the horizontal axis and 500 mV along the vertical axis

Вторая группа экспериментов проводилась с использованием передачи по каналу повторяющихся пакетов данных в виде пачек импульсов, излучаемых передатчиком. В приемнике эти импульсы обрабатываются логарифмическим детектором, который их детектирует, преобразует в логарифмический масштаб, фильтрует с помощью фильтра нижних частот и выдает на выходе огибающую результата воздействия последовательности этих операций на входные импульсы (рис. 8).

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

Третья группа экспериментов была посвящена определению вероятности ошибок в канале связи 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} .

6.2. Полевые испытания

Полевые испытания проводились в несколько этапов 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.

Целью испытаний во всех случаях было определение практической дальности приема и передачи в зависимости от вариантов комплексирования аппаратуры и условий местности.

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.



(a)



(б)

Рис. 9. Место проведения измерений: участок на карте (а); закрепление антенны (б).

Fig. 9. Location of measurements: area on the map (a); fixing the antenna (b)

Если посмотреть на последний столбец таблицы 1, становится ясно, что это может быть связано с множителем Введенского, который сильно зависит от высоты расположения антенн. В первой серии эта высота составляла 1.5—2.0 метра. В связи с этим во второй серии высота расположения антенн была увеличена до 3 метров (рис. 9), что привело к увеличению интерференционного множителя в 3—4 раза (5—6 дБ). Этого уже должно было хватить, чтобы достигнуть дальности более километра. Следует также отметить, что уровень внешних шумов на трассе проведения

второй серии экспериментов был примерно на 1.5 дБ ниже, чем при первой серии. В результате экспериментально зафиксированная дальность связи оказалась близкой к 1500 метрам. Было также установлено, что в рассматриваемых условиях снижение высоты размещения антенн до уровня 2.3 м приводило к уменьшению максимальной дальности связи до 1100—1200 метров.

7. Заключение

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.

Список литературы

1. Fontana R. J. A Brief History of UWB Communications. Germantown : Multispectral Solutions, Inc. 2000. URL: <https://ru.scribd.com/document/92157802/A-Brief-History-of-UWB-Communications>
2. Kim K. J. Samsung Expects UWB To Be One of the Next Big Wireless Technologies. Samsung Newsroom. URL: <https://news.samsung.com/global/samsung-expects-uwband-to-be-one-of-the-next-big-wireless-technologies>
3. Coppens D., De Poorter E., Shahid A., Lemey S., Marshall. C. An Overview of Ultra-WideBand (UWB) Standards (*IEEE* 802.15.4, FiRa, Apple) : Interoperability. Aspects and Future Research Directions. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02190>
4. Fontana R. J. Recent Trends in Ultra Wideband Communications Systems. Germantown : Multispectral Solutions Inc., 2004. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/97f0/b8bce6050ac3a36cd359426e24275e4b67cb.pdf>

5. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос. Новые носители информации для средств связи. М. : Физматлит, 2002. 251 с.
6. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой. М. : Техносфера, 2019. 320 с.
7. Дмитриев А. С., Попов М. Г., Рыжов А. И. Повышение дальности действия сверхширокополосных прямохаотических средств связи // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 9. С. 902—910.
8. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М. : Связь, 1972. 336 с.
9. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Максимов Н. А., Панас А. И. Генерация хаоса. М. : Техносфера, 2012. 424 с.
10. Калошин В. А., Мартынов Е. С., Скородумова Е. А. Исследование характеристик поликонической антенны в широкой полосе частот // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 9. С. 1094—1098.

Информация об авторах

Дмитриев А. С., сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация.

Ефремова Е. В., сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация.

Ицков В. В., сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация.

Петросян М. М., сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация.

Рыжов А. И. сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация.

Ultrawideband Communication Based on Chaotic Radio Pulses Using VHF and UHF Bands

A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, V. V. Itskov,
M. M. Petrosyan, and A. I. Ryzhov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
Mokhovaya st., 11/7, Moscow, 125009, Russian Federation
chaos@cplire.ru*

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *In this article, the state of art in the area of ultrawideband (UWB) communication using VHF and UHF frequency bands is analyzed and its relevance is shown, including direct chaotic communication. The problem of creation of UWB direct chaotic transceivers using VHF and UHF frequency bands is investigated from both the theoretical point of view and its practical implementation. Potential characteristics of the devices working in these bands are estimated, such as transmission rate, communication distance, energy consumption, error probability rate and link margin calculus. 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.*

For citation (IEEE): A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, V. V. Itskov, M. M. Petrosyan, and A. I. Ryzhov, “Ultrawideband Communication Based on Chaotic Radio Pulses Using VHF and UHF Bands,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 25–44, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.02. (In Russ.).

References

- [1] R. J. Fontana, *A Brief History of UWB Communications*. Germantown: Multispectral Solutions, Inc. 2000. URL: <https://ru.scribd.com/document/92157802/A-Brief-History-of-UWB-Communications>.
- [2] K. J. Kim, *Samsung Expects UWB To Be One of the Next Big Wireless Technologies*. Samsung Newsroom. URL: <https://news.samsung.com/global/samsung-expects-uwband-to-be-one-of-the-next-big-wireless-technologies>.
- [3] D. Coppens, E. De Poorter, A. Shahid, S. Lemey, and C. Marshall, *An Overview of Ultra-WideBand (UWB) Standards (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability. Aspects and Future Research Directions*. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02190>.

- [4] R. J. Fontana, *Recent Trends in Ultra Wideband Communications Systems*. Germantown: Multispectral Solutions Inc., 2004. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/97f0/b8bce6050ac3a36cd359426e24275e4b67cb.pdf>.
- [5] A. S. Dmitriev and A. I. Panas, *Dynamic Chaos. New media for communications*. Moscow: Fizmatlit, 2002. (In Russ.).
- [6] A. S. Dmitriev and E. V. Efremova. *Processes of information transmission and processing in systems with complex dynamics*. Moscow: Technosfera, 2019. (In Russ.).
- [7] A. S. Dmitriev, M. G. Popov, and A. I. Ryzhov, "Increasing the range of ultra-wideband direct chaotic communications," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 65, no. 9. pp. 902–910, 2020.
- [8] M. P. Dolukhanov, *Propagation of radio waves*. Moscow: Svyaz', 1972. (In Russ.).
- [9] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, N. A. Maksimov, and A. I. Panas, *Chaos Generation*. Moscow: Technosfera, 2012. (In Russ.).
- [10] V. A. Kaloshin, E. S. Martynov, and E. A. Skorodumova, "Investigation of the characteristics of a polyconical antenna in a wide frequency band," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 56, no. 9, pp. 1094–1098, 2011. (In Russ.).

Information about the authors

A. S. Dmitriev, employee of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russian Federation.

E. V. Efremova, employee of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russian Federation.

V. V. Itskov, employee of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russian Federation.

M. M. Petrosyan, employee of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russian Federation.

A. I. Ryzhov, employee of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russian Federation.