

**ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС
В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ**

УДК 621.391

**ПРЯМОХАОТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ
В МЕТРОВИИ И ДЕЦИМЕТРОВИИ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН**

© 2022 г. А. С. Дмитриев^а, *, Е. В. Ефремова^а, В. В. Ицков^а, М. М. Петросян^а,
А. И. Рыжов^а, И. Ф. Турканов^б

^а*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

^б*АО “Концерн “Гранит”, Гоголевский бульвар, 31, стр. 2, Москва, 119019 Российская Федерация*

**E-mail: chaos@cplire.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 14.03.2022 г.

Принята к публикации 25.03.2022 г.

Рассмотрена задача создания сверхширокополосных (СШП) прямохаотических средств связи в метровом и дециметровом диапазоне радиоволн, обсуждаются особенности данного диапазона с точки зрения распространения электромагнитного излучения и оцениваются его потенциальные возможности. Описаны разработанные экспериментальные прямохаотические преемопередатчики диапазона 200...450 МГц, их структура, техническая реализация и характеристики. Приведены результаты лабораторных и полевых испытаний созданных макетов, продемонстрировавших дальности передачи до 1.5 км, что соответствует расчетным характеристикам.

DOI: 10.31857/S0033849422080046

ВВЕДЕНИЕ

История активных исследований и разработок в области сверхширокополосной (СШП) беспроводной связи насчитывает уже около 30 лет. Однако первые исследования начались значительно раньше, еще в 60-е годы XX в. Этому раннему этапу в развитии идей сверхширокополосной связи посвящен, например, обзор [1]. Системная работа по развитию средств широкополосной связи и их стандартизации стартовала в начале 2000 годов с создания спектральных масок для нелицензируемого применения СШП-сигналов в США, России, странах Евросоюза и других. Была разработана серия стандартов по СШП-связи – IEEE802.15.4a-2007, IEEE802.15.4-2011, IEEE802.15.6-2011, IEEE802.15.4f-2012, IEEE802.15.4z-2020, ETSI стандарт EN 302 065-1-1-2016 – с диапазоном скоростей передачи от десятков килобит в секунду до 24 Мбит/с, позволяющая применять решения по СШП-связи для широкого круга прикладных задач. При этом одним из приоритетов являлось использование таких средств для высокоточного определения расстояния и местоположения устройств.

Основой для последней модификации стандарта по СШП-связи – IEEE802.15.4z-2020 – послужили исследования и разработки по созданию интегрированных полнофункциональных устройств (<https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/>

dwm1000-datasheet-v1.3.pdf), которые в значительной степени подготовили качественный скачок в области массового использования средств СШП-связи.

За прошедшие годы несколько раз делались попытки создать различные альянсы для продвижения СШП-технологий в практическую плоскость, но только в 2018 г. 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 решений на основе СШП-связи. Первой большой компанией, внедрившей СШП-чипы в свои устройства, стала Apple (чип Apple U1) (<https://support.apple.com/guide/security/ultra-wideband-security-sec1e6108efd/web>). За ней последовали компании Samsung [2], Xiaomi и др. Все заявленные продукты используют технологию ультракоротких импульсов и серий таких импульсов в диапазоне частот 3.1...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 Multi-spectral Solutions, начинались именно в этих диапазонах [4].

1. ПРЯМОХАОТИЧЕСКАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ

Ультракороткие импульсы и серии таких импульсов являются лишь одним из возможных типов сигналов с СШП-спектром, пригодных для применения в средствах СШП-связи. Одним из альтернативных типов СШП-сигналов являются прямохаотические сигналы. Схема передачи информации на их основе была предложена 20 лет назад [5, 6]. Первые эксперименты были проведены в 2000 г. в диапазоне частот 900...1000 МГц, была продемонстрирована работоспособность предложенного подхода. В подходе имелись 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, а не непрерывных, хаотических сигналов и некогерентный энергетический прием хаотических сигналов с помощью детектора огибающей.

В 2001 г. экспериментально была продемонстрирована работоспособность предложенного решения не только для широкополосных, но и для сверхширокополосных 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 г. и по 2021 г. был проведен ряд НИР и НИОКР, в результате которых 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 м) [6, 7].

Цель данной работы – рассмотреть возможность создания прямохаотических беспроводных СШП-средств связи в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. Для этого была проведена оценка потенциальных характеристик средств прямохаотической связи в частотном диапазоне 100...1000 МГц, разработаны экспериментальные макеты сверх-

широкополосных приемопередатчиков в полосе частот, входящей в этот диапазон, и проведены испытания созданных устройств в лабораторных и полевых условиях.

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

2. 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 СШП-сигналов в США допускает их использование 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, в 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 оцен-

ки времени задержки прихода непрямых 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 позволило единообразно оценивать различные предлагаемые решения не только с учетом межсимвольной интерференции, но и, например, скорости затухания сигнала при увеличении 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.

Теоретические и экспериментальные исследования проведены в диапазоне частот 200...450 МГц (полоса 250 МГц), лежащем в средней части диапазона 100...1000 МГц и перекрывающемся 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 хаотические СШП-радиоимпульсы. Цифровой двоичной информационной последовательности ставится в соответствие последовательность хаотических СШП-радиоимпульсов. Передаваемый символ (бит) кодируется наличием/отсутствием радиоимпульса на предписанной временной позиции (ортогональ-

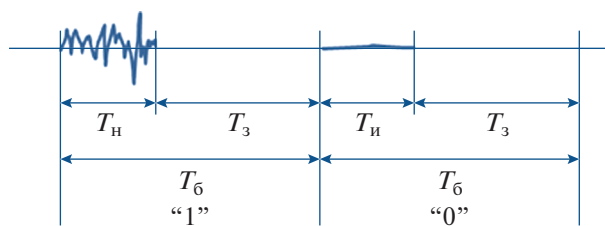


Рис. 1. Структура бита.

ная модуляция типа “включил-выключил”). Для борьбы с эффектами многолучевого распространения (межимпульсными помехами) в прямохаотических системах применяются защитные интервалы (рис. 1). Таким образом, основными параметрами сигнала на физическом уровне являются длительности: бита $T_б$, импульса $T_и$ и защитного интервала $T_з$, где $T_б = T_и + T_з$.

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

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ В КАНАЛЕ С БЕЛЫМ ШУМОМ

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

В табл. 1 приведены 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]:

$$E_n = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} = E_{n0} V, \quad (1)$$

где E_n — амплитуда электрического поля в точке приема, $E_{n0} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r}$ — амплитуда электриче-

Таблица 1. Расчет канала связи

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

ского 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.

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.

4. ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК

Структура 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 (персональ-

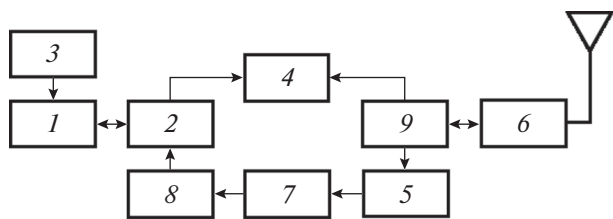


Рис. 2. Структура приемопередатчика: 1 – микроконтроллер; 2 – ПЛИС; 3 – акустический датчик; 4 – генератор хаоса с усилителем; 5 – фильтр нижних частот; 6 – фильтр верхних частот; 7 – маломушящий усилитель; 8 – логарифмический детектор; 9 – радиочастотный ключ.

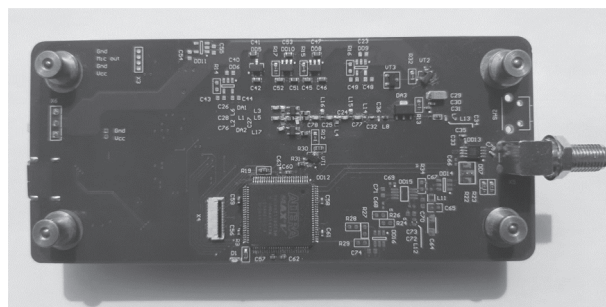


Рис. 3. Макет передающей части СШП-приемопередатчика системы связи.

ным 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, маломушящего усилителя МШУ 7, и логарифмического детектора ЛД 8. Коммутация между передающим и принимающим каналами осуществляется через специальный радиочастотный ключ РЧ 9.

Внешний вид макета приемопередатчика представлен на рис. 3.

4.1. 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 зарекомендовавшей себя на частотах выше 500 МГц [9].

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, 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 (см. рис. 4б). Ширина

полосы частот хаотических СШП-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, на котором исследовали, как значения параметров электрической схемы влияют на изменения режимов работы. По результатам этих исследований были подобраны два режима, обеспечивающие формирование хао-

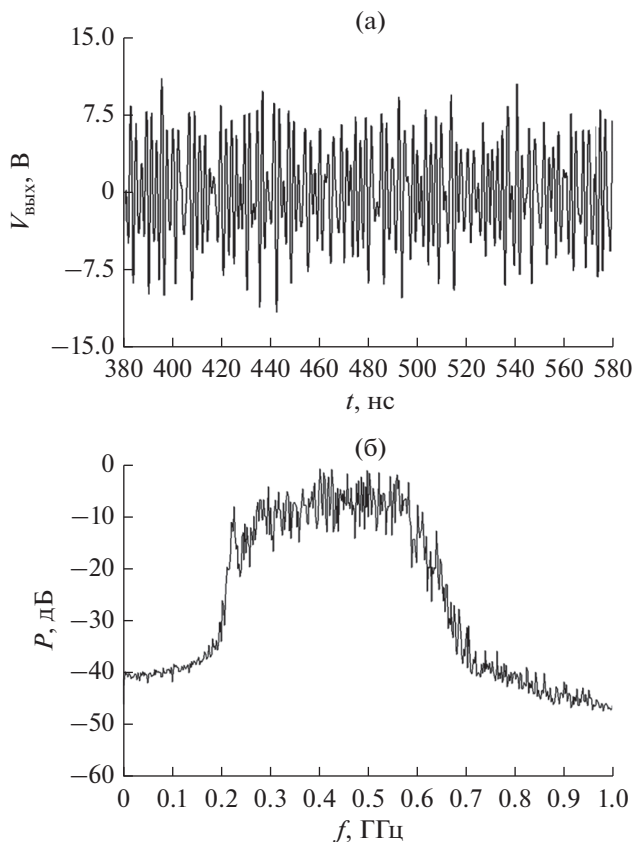


Рис. 4. Модель разработанного хаотического генератора: а – фрагмент временной реализации сигнала генератора; б – спектр мощности сигнала генератора.

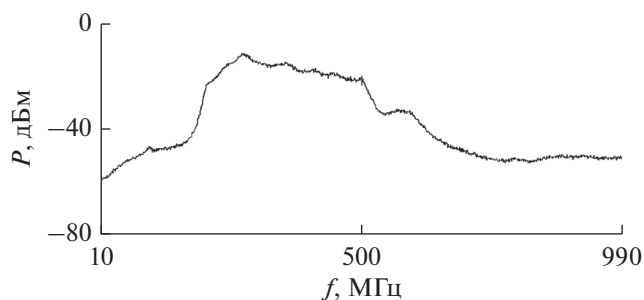


Рис. 5. Спектр мощности сигнала на выходе усилительного тракта.

тического сигнала на выходе передающей части с мощностью $P = 20$ и $23...24$ дБм.

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

4.2. Приемный тракт

Радиосигнал, принятый внешней антенной, поступает на СВЧ-ключ, который коммутирует антенну с приемным трактом. Далее радиосигнал пропускается последовательно через ФВЧ и ФНЧ 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 ЛД AD8310, обладающий чувствительностью -78 дБм при динамическом диапазоне 95 дБ и рабочем диапазоне частот $0...440$ 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.

4.3. 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 акустическим датчиком, USB для взаимодействия с ПК). Модуляция высокочастотного передаваемого сигнала и демодуляция принимаемого из эфира сигнала осуществляется при помощи ПЛИС семейства MAX5.

Для полноценной работы приемопередатчика необходимо специальное программное обеспечение, которое позволяет получать данные от акустического датчика, осуществлять их беспроводную передачу 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 приема пакета с данными, производить синхронизацию с принимаемым пакетом данных.

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

4.4. 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.

На рис. 6 приведено окно программы, соответствующее рабочему режиму во время активной передачи данных. Имеется возможность запуска и остановки прослушивания данных.

4.5. Антенны

В работе использовались несколько типов антенн, среди которых:

A1 – измерительная биконическая антенна П6-62 диапазона $0.3...1.0$ ГГц (рис. 7а), размеры антенны $400 \times 145 \times 150$ мм;

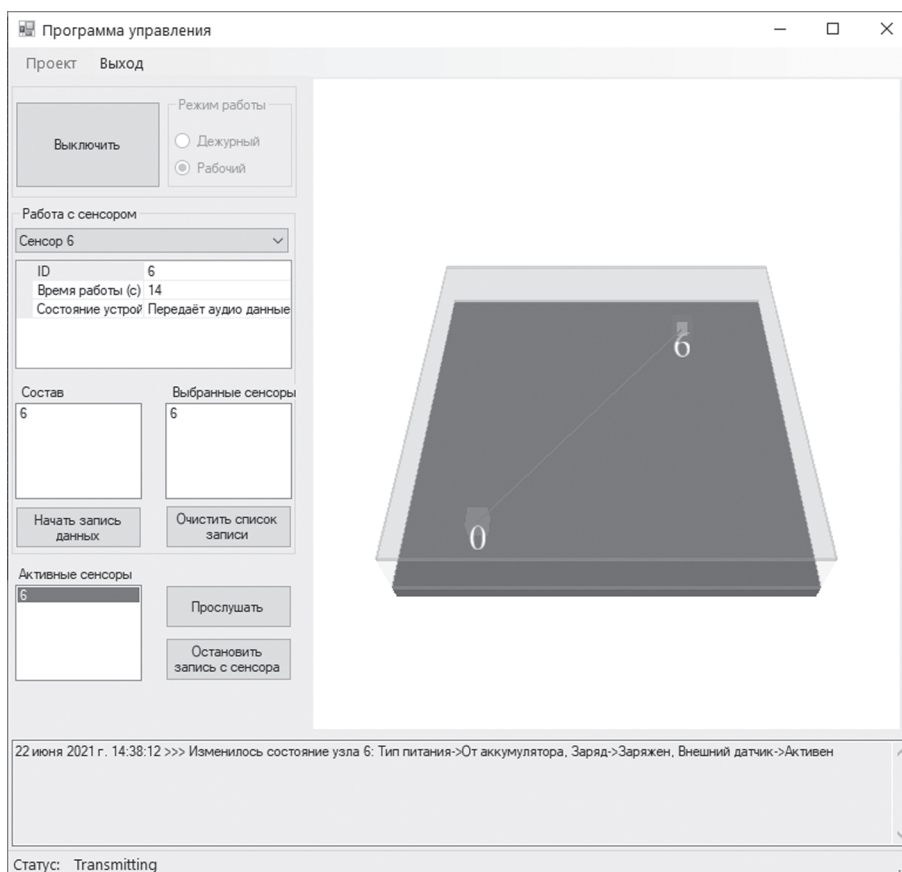


Рис. 6. Рабочее окно программы в режиме передачи звуковых данных (скриншот).

A2 – гиперширокополосная биконическая антенна с рабочим диапазоном 0.15...21 ГГц, [10], размеры антенны 550 × 420 × 420 мм (рис. 7б);

A3 – измерительная биконическая антенна VicoLOG, (рис. 7в), размеры антенны 350 × 160 × 140 мм.

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

5.1. Лабораторные измерения

При проведении первой серии измерений оценивался динамический диапазон приемника. Результаты проведенных измерений приведены на рис. 8. Как видно из рисунка, 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.

Вторую серию экспериментов проводили с использованием передачи по каналу повторяющихся пакетов данных в виде пачек импульсов, излучаемых передатчиком. В приемнике эти импульсы обрабатываются логарифмическим детектором, ко-

торый их детектирует, преобразует в логарифмический масштаб, фильтрует с помощью ФНЧ и выдает на выходе огибающую результата воздействия последовательности этих операций на входные импульсы (рис. 9).

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

Третья серия 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} .

5.2. 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 за-

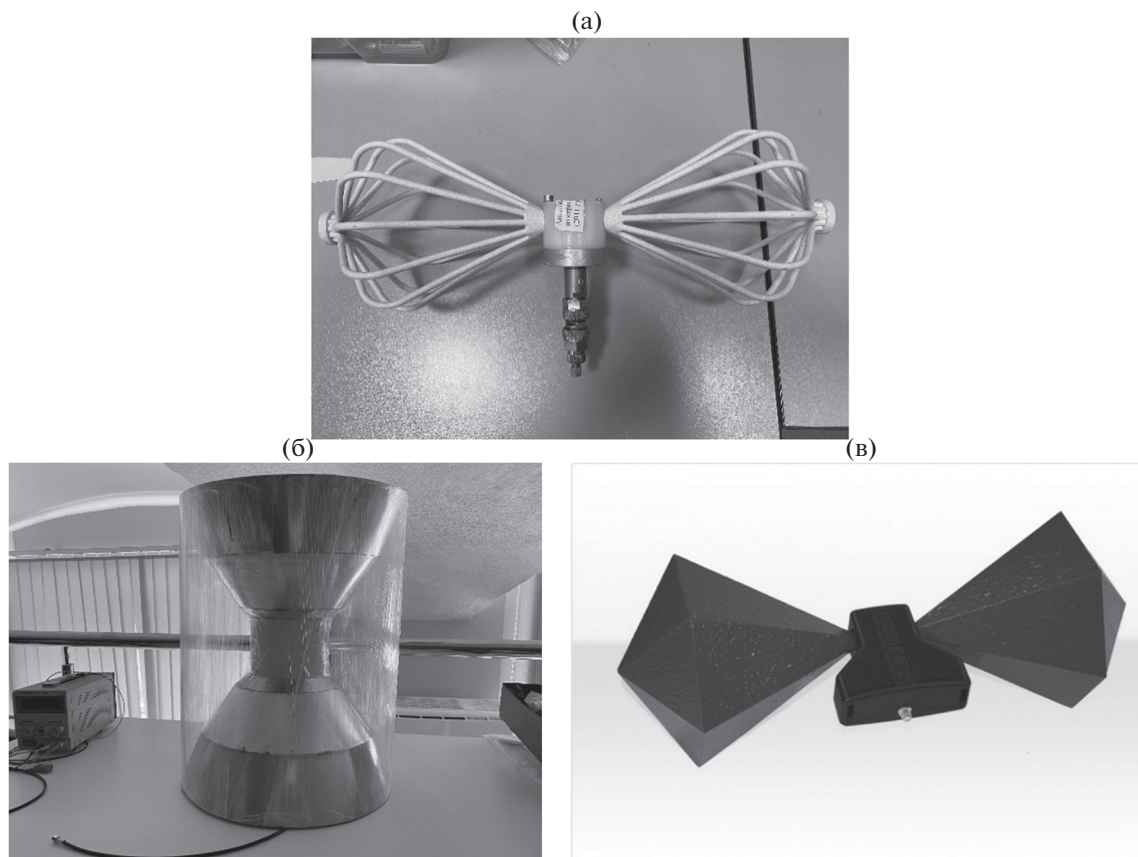


Рис. 7. Внешний вид антенн, использовавшихся в работе: а – биконическая измерительная антенна П6-62; б – гиперширокополосная биконическая антенна на диапазон 0.15...21 ГГц; в – измерительная биконическая вибраторная антенна VicoLOG.

стройкой, 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.

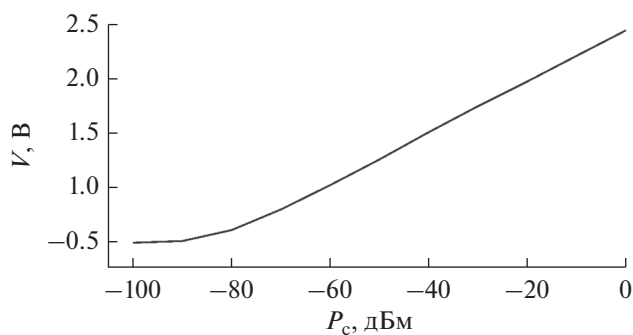


Рис. 8. Уровень сигнала на выходе ЛД в зависимости от мощности поступающего на вход приемника постоянно РЧ-сигнала.

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 м. 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.

В связи с этим было высказано предположение, что ограничение по дальности определяется

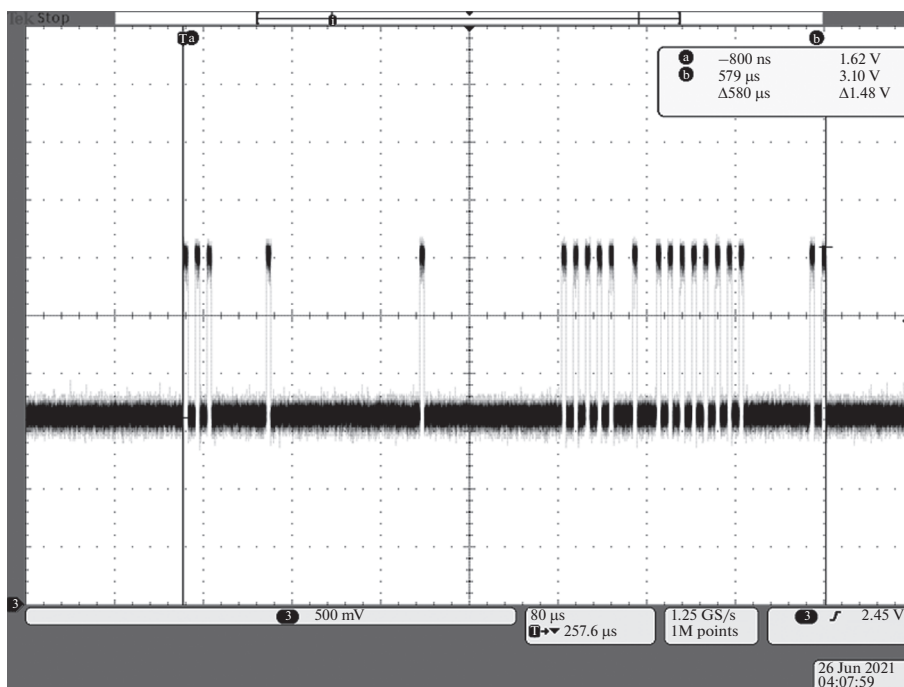


Рис. 9. Вид одного пакета данных, полученный после логарифмического детектора в низкочастотной части приемного тракта. Масштаб: в одной клетке 80 мкс по горизонтальной оси и 500 мВ по вертикальной (скриншот).

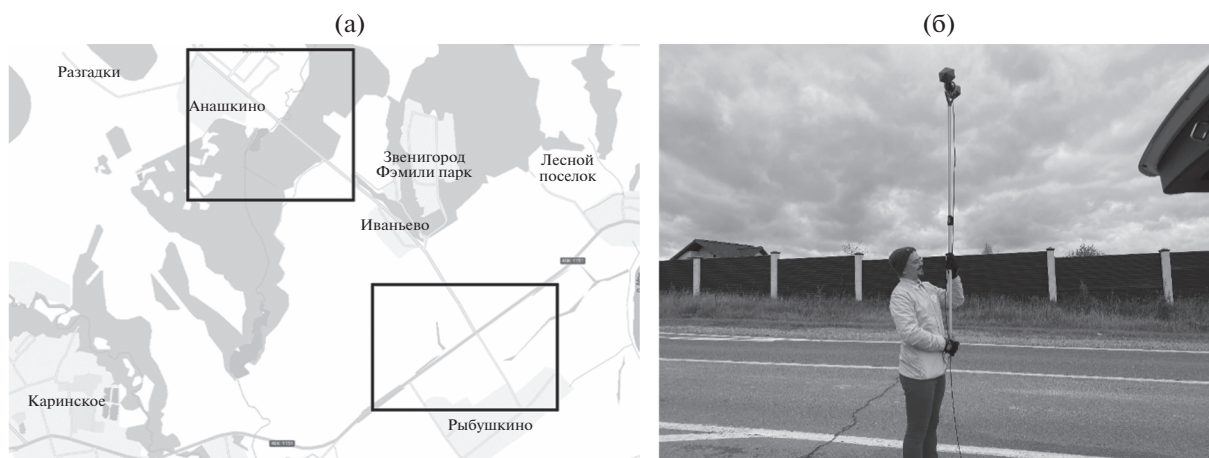


Рис. 10. Место проведения измерений: а – участок на карте; б – закрепление антенны.

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. Основные параметры системы для этого случая представлены в последнем столбце табл. 1. Наиболее критическим здесь является значение интерференционного множителя в формуле Введенского для двухлучевой модели. Значение этого множителя сильно зависит от высоты расположения антенн у приемника и передатчика. В первой серии экспериментов высота расположения приемника и передатчика составляла 1.5 м. Если изменить высоту антенн приемника и передатчика в

2 раза, с 1.5 до 3 м, то бюджет канала связи 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 (рис. 10). Этого уже должно было хватить, чтобы достигнуть дальности более километра. Реальная зафиксированная дальность связи оказалась около 1500 м. 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 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fontana R.J.* A Brief History of UWB Communications. Germantown: Multispectral Solutions, Inc. 2000. www.multispectral.com/hystory/html, <https://ru.scribd.com/document/92157802/A-Brief-History-of-UWB-Communications>.
2. *Kim K.J.* // Samsung Newsroom. Suwon-si: Samsung Electronics Ltd., 12. Oct. 2020. <https://news.samsung.com/global/samsung-expects-uwbt-to-be-one-of-the-next-big-wireless-technologies>.
3. *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>
4. *Fontana R.J.* Recent Trends in Ultra Wideband Communications Systems. Germantown: Multispectral Solutions Inc., 2004. <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.
6. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой. М.: Техносфера, 2019.
7. *Дмитриев А.С., Попов М.Г., Рыжов А.И.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 9. С. 902.
8. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
9. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012.
10. *Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 9. С. 1094.