

**ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС
В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ**

УДК 621.391,621.396

**ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРЯМОХАОТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЯЗИ**

© 2020 г. А. С. Дмитриев^а, М. Г. Попов^а, А. И. Рыжов^а, *

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

*E-mail: mef.box@gmail.com

Поступила в редакцию 24.09.2019 г.

После доработки 24.09.2019 г.

Принята к публикации 20.10.2019 г.

Рассмотрена задача увеличения дальности действия прямохаотических сверхширокополосных приемопередатчиков. Проведены теоретические оценки характеристик, определяющих радиус действия. Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы приемопередатчиков с пропускной способностью до 12 Мбит/с и дальностью действия более 200 м. Подготовлено и апробировано программное обеспечение к ним. Проведены измерения характеристик созданных устройств, подтвердившие теоретические оценки.

DOI: 10.31857/S0033849420080021

ВВЕДЕНИЕ

С начала 2000 годов, после принятия национальных спектральных масок по нелицензированному использованию сверхширокополосных (СШП) сигналов в беспроводной связи^{1, 2, 3}, основные интересы исследователей и разработчиков были сосредоточены на изучении систем персональной связи, радиус действия которых достигает 30...40 м (системы малого радиуса действия) [1–3]. Между тем имеется целый ряд задач, для которых представляет интерес использование средств СШП-связи на расстояниях до 100 м и более. В частности, большое внимание этому вопросу уделяется в связи с проблемой измерения расстояний с большой точностью и создания средств позиционирования на этой основе^{4, 5}. Имеется и ряд собственно коммуникационных задач, где применение средств СШП-связи представляет значительный интерес: например, создание локаль-

ной инфокоммуникационной структуры для малых населенных пунктов [4].

При создании таких средств связи возникает ряд новых вопросов как по техническим характеристикам приемопередающих устройств и их реализации, так и по условиям применения.

В данной работе эти вопросы изучаются применительно к прямохаотическим средствам СШП-связи [5–7].

**1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ
ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ
ПРЯМОХАОТИЧЕСКИХ
СШП-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ**

При переходе от приемопередатчиков прямохаотической связи малого радиуса действия с дальностью работы до 30...40 м к средствам с дальностью, характерной для локальных средств беспроводной связи (с дальностью до 100...200 м), должен быть учтен ряд факторов, определяющих диапазон расстояний работоспособности линии связи, в том числе:

- мощность передатчика;
- чувствительность приемника;
- направленность антенн;
- база хаотических радиоимпульсов;
- наличие многолучевого распространения (межсимвольная интерференция).

Вероятность ошибки на 1 бит при приеме определяется отношением энергии сигнала на 1 бит

¹ Решение Федеральной комиссии по связи (FCC) США № FCC 02-48 от 14/02/2002.

² Решение ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г.

³ Standardisation mandate forwarded to CEN/CENELEC/ETSI for harmonised standards covering ultra-wideband equipment. European Commission. TCAM Secretariat. Brussels, 19 April 2007.

⁴ Zebra UWB Tag Portfolio Spec Sheet // https://www.zebra.com/content/dam/zebra_new_ia/en-us/solutions-verticals/product/location_solutions/zebra-ultra-wideband/uwb-tag/spec-sheet/uwb-tag-spec-sheet-en-us.pdf.

⁵ Decawave DWM1000 Module // <https://www.decawave.com/product/dwm1000-module/>.

информации к спектральной плотности шума E_6/N_0 на входе приемника, которое для свободно-пространства рассчитывается по формуле [8]

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{P_{\text{пер}} T_6 G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}{LN_0 N_{\Phi} I}, \quad (1)$$

или в логарифмическом масштабе

$$\left(\frac{E_6}{N_0} \right)_{\text{дБ}} = (P_{\text{пер}})_{\text{дБВ}} + T_6 + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - L - N_0 - N_{\Phi} - I, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность излучения передатчика; T_6 – длительность бита; $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{пр}}$ – усиление антенн передатчика и приемника; $L = 4\pi R^2$ – потери в канале связи, $N_0 = kT$ – мощность теплового шума входных цепей приемника, N_{Φ} – шум-фактор приемника, I – потери на реализацию.

Из (1) следует, что дальность передачи в свободном пространстве

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} T_6 G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}{4\pi (E_6/N_0) N_0 N_{\Phi} I}} \quad (3)$$

прямо пропорциональна корню квадратному из излучаемой мощности, длине бита, коэффициентам усиления передающей и приемной антенн, и обратно пропорциональна корню квадратному из произведения (E_6/N_0) на коэффициент шума приемника, спектральной плотности шума и потерям на реализацию.

Обозначим через $(E_6/N_0)_{\text{тр}}$ минимальное значение (E_6/N_0) для получения требуемой вероятности ошибок и через $(E_6/N_0)_{\text{пр}}$ реальное (принятое) значение для (E_6/N_0) . Разница между этими величинами дает энергетический резерв линии связи между передатчиком и приемником.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на дальность передачи. Первым таким фактором является база сигнала. Пусть B – база хаотического радиоимпульса $B = 2FT_{\text{и}}$, где F – полоса частот хаотического радиоимпульса и $T_{\text{и}}$ – его длительность [9–11].

Увеличение B позволяет при фиксированной мощности генератора хаоса увеличить излучаемую энергию, приходящуюся на 1 бит, и тем самым повысить предельную дальность передачи. Однако в прямохаотических средствах связи вероятность ошибки зависит не только от (E_6/N_0) , но и от базы сигнала. Это – свойство энергетического приема [12], которое является также характерным для радиометрических систем [13]. Асимптотическое значение $(E_6/N_0)_{\text{тр}}$ при больших базах сигнала пропорционально корню квадратному из базы сигнала, т.е. $(E_6/N_0)_{\text{тр}} \sim B^{1/2}$. Поэтому, хотя с увеличением базы сигнала энергия принимаемого бита растет пропорционально $B^{1/2}$ при фиксиро-

ванной мощности передатчика, дальность действия устройства растет медленнее – пропорционально $B^{1/4}$.

Из (3) следует, что повышение мощности излучения – прямой способ увеличения дальности действия передатчика, к тому же зачастую наиболее простой в реализации.

Вторым фактором, влияющим на дальность связи, является чувствительность приемника. Она зависит от полосы принимаемого сигнала, метода модуляции и демодуляции, температуры приемника и качества входных малошумящих усилителей, характеризующего коэффициентом шума N_{Φ} .

Суммируя сказанное выше, отметим, что основные факторы – мощность, база сигнала, коэффициенты усиления антенн передатчика $G_{\text{пер}}$ и приемника $G_{\text{пр}}$ – сказываются соответственно на дальности передачи D следующим образом:

$$D \sim P^{1/2}, \quad D \sim B^{1/4}, \quad D \sim (G_{\text{пер}} G_{\text{пр}})^{1/2}.$$

В табл. 1 представлены расчеты бюджета каналов для приемопередатчика типа ППС-4* (при скорости передачи $R_6 = 6$ Мбит/с) и ППС повышенной дальности (при скорости передачи $R_6 = 1.5$ Мбит/с) и соответствующие итоговые значения энергетического резерва.

2. ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКИ ПОВЫШЕННОЙ ДАЛЬНОСТИ

Рассмотрим приемопередатчики с повышенной дальностью действия, созданные в рамках НИР “Калинка” [4]. При их разработке за основу были взяты СШП-приемопередатчики типа ППС-4* [11, 12] с дальностью действия до 30 м (см. табл. 1).

В новых устройствах мощность излучаемого сигнала была увеличена до 100 мВт (в импульсе), а чувствительность приемника по отношению к приемникам устройств ППС-4* повышена на 4 дБ.

Передатчик устройства (рис. 1) включает в себя генератор хаоса 1, формирующий поток хаотических радиоимпульсов, модулятор 2, выходной усилитель 3, переключатель передатчик-приемник 4, антенну 5 и цифровой блок 6, который осуществляет преобразование цифрового потока бит в видеоимпульсы, подаваемые на вход модулятора. Приемник устройства состоит из антенны, цифрового блока и переключателя (общих с передатчиком), малошумящего усилителя 7; детектора огибающей 8 на основе логарифмического детектора, преобразующего микроволновые колебания в импульсы огибающей с амплитудой, пропорциональной логарифму мощности принимаемого радиосигнала. Цифровой блок преобразует последовательность импульсов огибающей в набор цифровых отсчетов, декодируемый в последовательность бит.

Таблица 1. Бюджет канала связи

Параметр	Приемопередатчик типа ППС-4*	Приемопередатчик с повышенной дальностью
R_6	6.0 Мбит/с	1.5 Мбит/с
$P_{пер}$	7 дБм	14 дБм
$G_{пер}$	0 дБ	0 дБ (3 дБ)
$F_{ср}$	4.0 ГГц	4.0 ГГц
$L_1 = 20 \lg 10(4\pi f_{ср}/c)$	44.0 дБ	44.0 дБ
$L_2 = 20 \lg 10(D)$	29.54 дБ при $d = 30$ м	40.0 дБ при $d = 100$ м 46.0 дБ при $d = 200$ м
$G_{пр}$	0 дБ	0 дБ (3 дБ)
$P_{пр} = P_{пер} + G_{пер} + G_{пр} - L_1 - L_2$	-67.0 дБм	-70.0 дБм
$N = -174 + 10 \lg(R_6)$	-106 дБм	-112 дБм
$N_{Ф}$	7 дБ	7 дБ
$P_{ш} = N + N_{Ф}$	-99 дБм	-105 дБм
Минимальное значение E_6/N_0	17 дБм	19 дБм
I	5 дБ	5 дБ
Энергетический резерв канала связи ($M = P_{пр} - P_{ш} - E_6/N_0 - I$)	10 дБ	11 дБ
Предлагаемая минимальная чувствительность приемника	-77 дБм	-81 дБм

Конструктивно приемопередатчики были разработаны в двух вариантах: с горизонтальным расположением платы и вертикальной внешней антенной (рис. 2а) и с вертикальным расположением платы и антенны (рис. 2б). Первый вариант более компактный, плата для него может быть расположена в стандартном покупном корпусе, приемопередатчик второго типа размещается в специально разработанном корпусе и более приспособлен для работы в условиях реальной среды. В обоих вариантах приемопередатчиков используются внешне подключаемые антенны, что обеспечивает определенную гибкость в обеспечении необходимого коэффициента усиления.

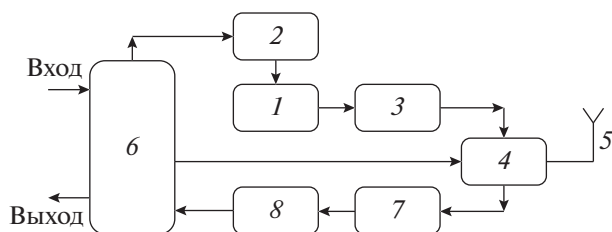


Рис. 1. Структура прямохаотического приемопередатчика: 1 – генератор хаоса, формирующий поток хаотических радиопульсов, 2 – модулятор, 3 – усилитель, 4 – переключатель передача/прием (ключ), 5 – антенна, 6 – цифровой блок, 7 – малозумящий усилитель, 8 – детектор огибающей.

Ниже приведены расчетные характеристики прямохаотического приемопередатчика:

Дальность связи в свободном пространстве, м	до 200
Физическая скорость, Мбит/с	6.0 (12.0)
Пиковая мощность излучения, дБм	20
Усиление антенны, дБ	0 (3)
Чувствительность приемника, дБм	-81

3. МНОГОЛУЧЕВОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

С энергетической точки зрения разработанные приемопередатчики должны обеспечивать дальность работы более 100 м в свободном пространстве. Эта характеристика была экспериментально подтверждена с помощью измерений на стенде с эквивалентным затуханием сигнала. Однако реальные трассы даже при наличии прямой видимости демонстрируют достаточно интенсивную многолучевость. Это характерно как для СШП-систем малого радиуса действия, так, как оказалось в процессе измерений, и для систем с повышенной дальностью, даже в условиях открытой местности.

Для борьбы с многолучевостью в прямохаотических средствах СШП-связи малого радиуса действия используются защитные интервалы. Длитель-

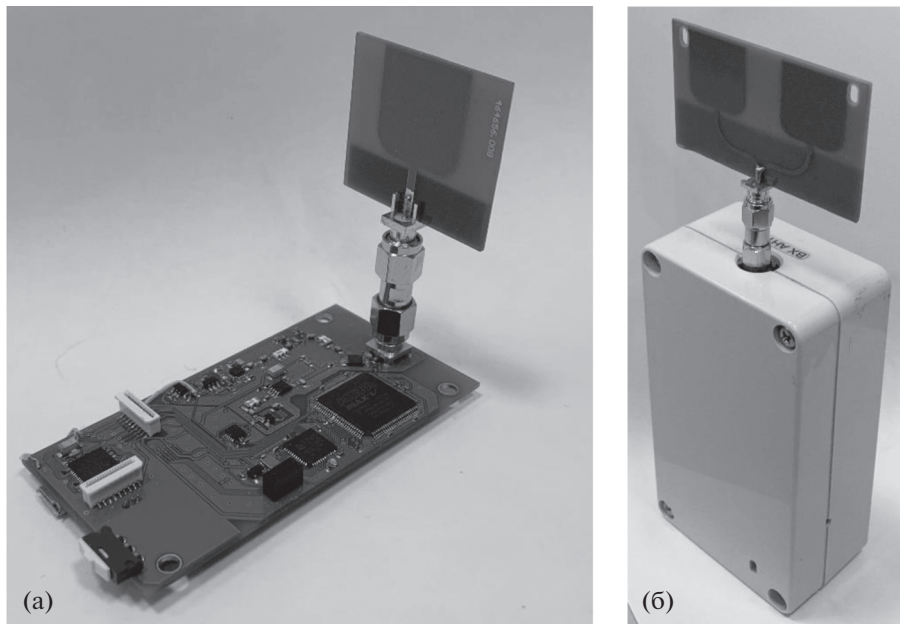


Рис. 2. Внешний вид приемопередатчиков: без корпуса с антенной, перпендикулярной плоскости платы (а) и в корпусе, антенна расположена вдоль печатной платы (б).

ность этих интервалов согласуется с характерными временами запаздывания для многолучевых каналов. Согласно моделям распространения, характерное время запаздывания для персональных систем связи укладывается в диапазон 30...40 нс. Исходя из соображений подобия можно ожидать, что в системах повышенной дальности характерное время запаздывания будет расти пропорционально планируемой дальности связи, поэтому при увеличении дальности до 100 м оно составит величину порядка 100 нс, и при дальности 200 м — около 200 нс. Это означает, что с учетом запаса защитный интервал в этих случаях должен составлять не менее 150 и 300 нс соответственно. При скважности 2 это соответствует максимальным скоростям передачи 3.0 и 1.5 Мбит/с.

Данная ситуация схематично представлена на рис. 3, где изображены два эллипса вокруг трассы распространения сигнала между передатчиком 1 и приемником 2. Сумма длин путей от передатчика к приемнику для каждого из эллипсов постоянна. Кривая каждого эллипса соответствует точкам однократного переотражения сигнала, излучаемого передатчиком. Время прохождения сигнала от передатчика к приемнику при однократном переотражении определяется по выражению $T_{\text{п}} = T_{\text{р}} + T_{\text{з}}$, где $T_{\text{р}}$ — время распространения между передатчиком и приемником по каналу с прямой видимостью, $T_{\text{з}}$ — время запаздывания. Внутренний эллипс соответствует времени распространения не прямых лучей $T_{\text{п}} \sim 1.5T_{\text{р}}$ при однократном переотражении, внешний эллипс соответствует времени распространения не прямых лучей $T_{\text{п}} \sim 2.0T_{\text{р}}$.

Эти соотношения наряду с энергетическими соотношениями, представленными в разд. 2, ограничивают дальность работы СШП линии связи.

Для пиковой мощности передатчиков 100 мВт и скважностей 2 и 4 оценки максимально возможных скоростей передачи от дальности могут быть получены из рис. 4а и 4б соответственно. Ограничивающие факторы — энергетический потенциал линии связи с учетом уменьшения эффективности использования принимаемой энергии импульса при увеличении длины импульса и характерное время запаздывания не прямых лучей.

На рис. 4а приведены результаты расчетов для передачи со скважностью 2 и, соответственно, средней мощностью 25 мВт. Линия 1 определяет ограничение по скорости, если в качестве критерия берется

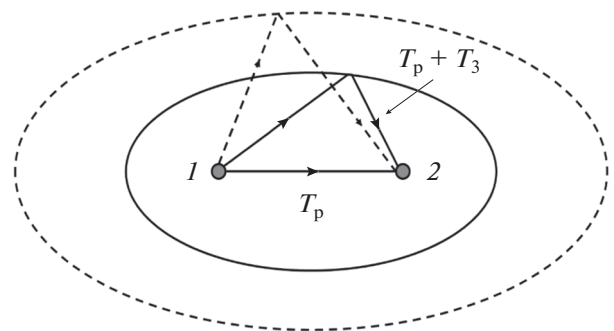


Рис. 3. Эллипсы, определяющие время распространения сигнала передатчика при однократном переотражении.

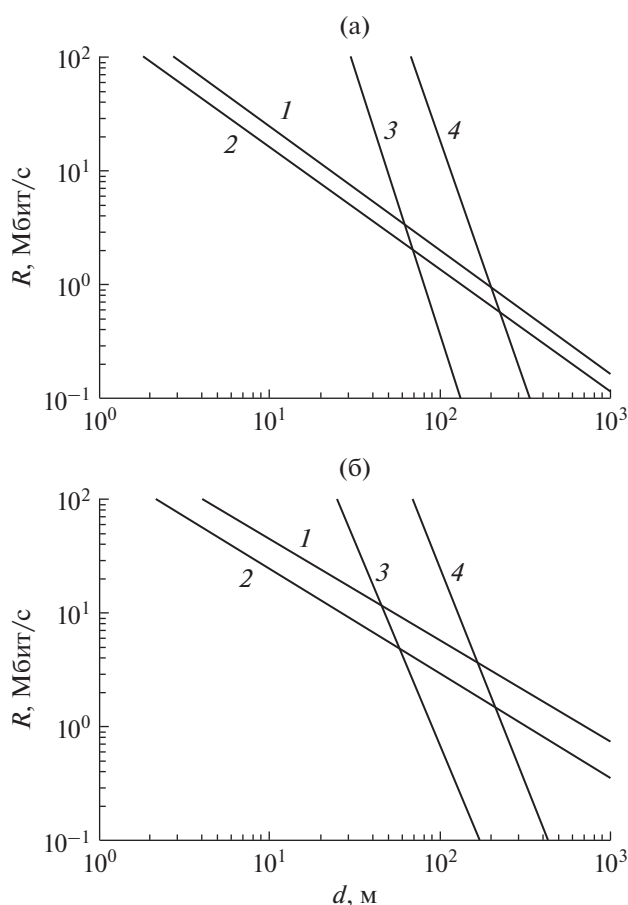


Рис. 4. Зависимости для оценки максимальной скорости передачи данных от дальности при скважности 2 (а) и 4 (б).

запаздывание, соответствующее однократному минимальному запаздыванию в соответствии с моделью запаздывания сигнала, которое пропорционально времени распространения прямого сигнала (см. рис. 3, внутренний эллипс; коэффициент запаздывания ~ 1.5 относительно времени распространения прямого сигнала). Линия 2 определяет ограничение на скорость, если в качестве критерия берется запаздывание, соответствующее двойному максимальному запаздыванию в упомянутой модели (см. рис. 3, внешний эллипс; коэффициент запаздывания ~ 2.0 по отношению ко времени распространения прямого сигнала).

Практически реализуемая из-за наличия многолучевого распространения максимальная скорость передачи лежит в полосе между этими линиями.

Линии 3 и 4 определяют энергетические ограничения на скорость передачи как функции дальности в случаях, когда в передатчике и приемнике используются антенны с $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 0$ дБ и $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 3$ дБ соответственно. Линии 1 и 2 расположены на рисунке ниже линий 3 и 4 вплоть до дальности

200...1000 м, и поэтому именно многолучевое распространение на этих расстояниях лимитирует максимальную скорость передачи. Например, при дальности 100 м максимальная скорость может составлять 1.3...2.0 Мбит/с, а при дальности 200 м — примерно 0.6...1.0 Мбит/с.

Поскольку энергетический потенциал не является ограничивающим фактором можно попытаться увеличить дальность передачи за счет увеличения скважности.

На рис. 4б приведена структура ограничивающих линий для передачи со скважностью 4 и пиковой мощностью в импульсе 100 мВт (отметим, что средняя мощность в этом случае равна 12.5 мВт, т.е. в два раза ниже по сравнению с передачей при скважности 2). Структура линий та же, что и в случае передачи со скважностью 2. Однако теперь при $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 0$ дБ ограничивающим фактором при дальности $d > 150$ м является энергетический потенциал линии связи. Максимальная скорость передачи на расстоянии 150 м составляет 2 Мбит/с. Для этих же антенн возможно увеличение дальности до 200 м, однако при уменьшении скорости передачи до 1.0 Мбит/с (линия 3).

Эта скорость может быть увеличена вдвое, до 1.5...3.0 Мбит/с, за счет увеличения коэффициента усиления антенн до 3 дБ (линия 4). При этом лимитирующим фактором снова начинает выступать многолучевое распространение.

4. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН И АДАПТИВНЫЕ ПОРОГИ

Динамический диапазон работы приемника прямохоотической системы обеспечивается широким динамическим диапазоном логарифмического детектора (до 55 дБ), применяемого в качестве чувствительного элемента. Такого динамического диапазона в целом хватает для приемопередатчиков персональной связи. При изменении расстояний от 1 м до 30 м в свободном пространстве диапазон изменения мощности принимаемого сигнала лежит в пределах 30 дБ. Однако ситуация может измениться, если требуемая дальность связи составляет 100...200 и более метров. В этом случае диапазон изменения мощности принимаемого сигнала при изменении расстояния от 1...2 м до 100...200 м составит уже 40...46 дБ, что может быть критично для работы линии связи при наличии дополнительных возмущающих факторов.

Поэтому для повышения устойчивости работы системы передачи во всем диапазоне изменения дальностей была разработана адаптивная настройка порога приемника, реализуемая программным образом.

Пусть канал связи несимметричен: условно один приемопередатчик представляет собой базовую станцию (БС), а второй — сенсорный узел

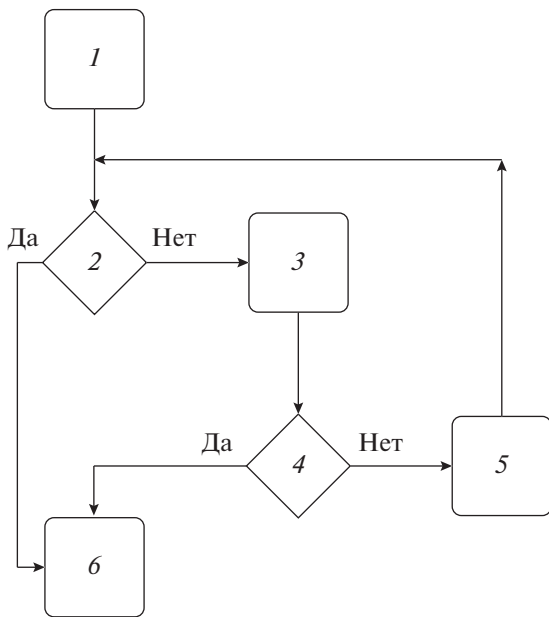


Рис. 5. Блок-схема алгоритма инициализации сети: 1 – начало работы алгоритма; 2 – проверка статуса СУ; 3 – изменение порога; 4 – проверка превышения количества инициализаций; 5 – инициализация сети; 6 – окончание работы алгоритма.

(СУ). Базовая станция осуществляет запросы на передачу, а основной поток данных идет в направлении сенсорный узел – базовая станция. Таким образом, первая задача БС заключается в побудке СУ, после чего он начинает передачу. В связи с такой конфигурацией критической является устойчивость работы приемника БС. В нем и реализована адаптивная настройка порога.

Адаптивная настройка порога на БС реализована для двух процессов: при инициализации сети (первый этап) и при приеме данных от сенсорного узла (второй этап).

При инициализации сети алгоритм выбора порога действует следующим образом (рис. 5). В файле программы задается массив из K пороговых значений $(p_1...p_k)$ для приемника БС. Вначале осуществляется проверка статуса устройства (проинициализировано оно или нет, блок 2). В случае, если устройство оказалось проинициализированным (например, из-за ранее прошедшей операции инициализации), работа алгоритма инициализации заканчивается (блок 6) и происходит переход к следующему этапу. В противном случае выставляется значение порога p_1 из списка пороговых значений (блок 3). Далее осуществляется проверка превышения максимального числа инициализаций K (блок 4). Если превышения нет, то запускается процесс инициализации сети (блок 5): БС посылает СУ серию пакетов побудки, и в случае принятия СУ хотя бы одного пакета-запроса сенсорное устройство посылает базовой

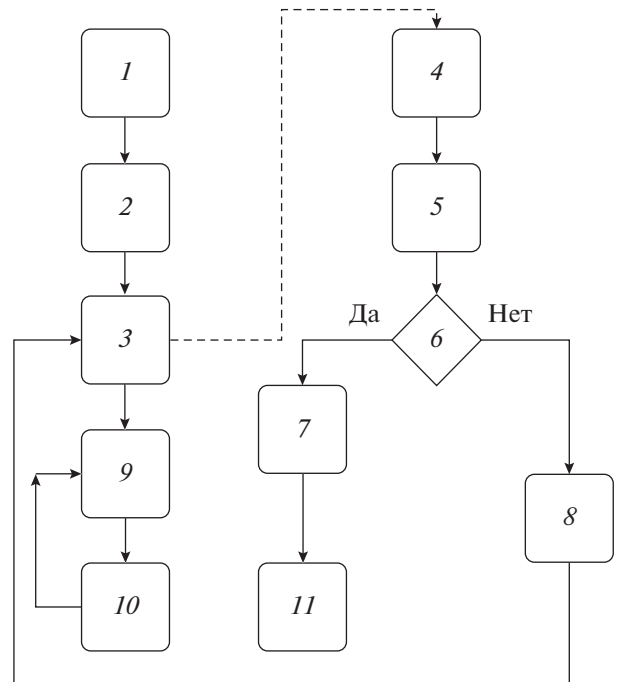


Рис. 6. Блок-схема автоматического подбора порога в режиме передачи данных: 1 – начало работы алгоритма; 2 – прием первого пакета из эфира; 3 – запуск таймера на подсчет времени T_n для СУ; 4 – таймер на подсчет BER; 5 – сохранение значения BER для порога P_i ; 6 – проверка наличия неиспользованных порогов; 7 – установление на БС порога с минимальным BER; 8 – выставление следующего значения порога на БС; 9 – обновление на БС информации о BER от СУ; 10 – прием пакета из эфира; 11 – окончание работы алгоритма.

станции ответный пакет, принятие которого БС означает обнаружение устройства и его успешную инициализацию. Если ни один пакет-запрос не принят, то процесс возвращается в блок 3, где выставляется следующее значение порога. Алгоритм инициализации заканчивает свою работу либо в случае обнаружения устройства, либо при превышении максимального числа попыток инициализации.

После инициализации, при приеме базовой станцией первого пакета с данными от сенсорного узла начинает работать алгоритм адаптивной настройки порога второго этапа (рис. 6). Для получения первого пакета с данными используется порог, полученный в конце инициализации сети.

Алгоритм второго этапа имеет две фазы работы: грубая настройка и точная настройка. Это сделано для снижения общего времени работы алгоритма, а также для того чтобы БС не работала длительное время со значениями порогов, на которых невозможна передача данных.

При грубой и точной настройке используется одна и та же процедура адаптации, отличия состо-

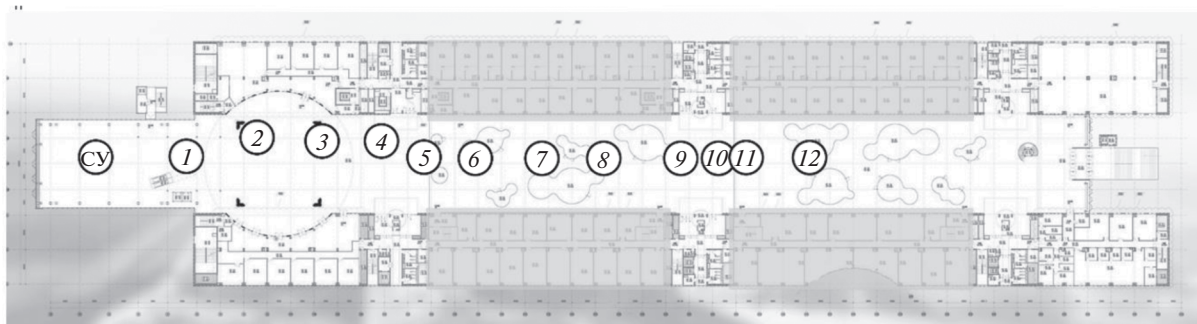


Рис. 7. Расположение БС в ходе проведения экспериментов последовательно на расстоянии (в м) от передатчика до приемника: 38 (точка 1), 55 (2), 85 (3), 105 (4), 115 (5), 130 (6), 150 (7), 170 (8), 200 (9), 210 (10), 220 (11), 240 (12); СУ – сенсорный узел (передатчик).

ят лишь в значениях порогов для БС. При грубой настройке используется система эквидистантных M порогов. В общем случае $M \neq K$. Из M значений порога процедура выбирает тот, которому соответствует минимальное значение вероятности ошибки на 1 бит (Bit Error Ratio, BER) при приеме. Далее осуществляется переход к точной настройке порога, где BER минимизируется локально в окрестности выбранного при грубой настройке значения порога.

Сам алгоритм работает следующим образом. При приеме пакета с данными от СУ (блок 2) запускается таймер на время T_n (блок 3), необходимый для регистрации временного интервала, в течении которого накапливается статистика о BER для узла сети (блок 9, 10). После окончания интервала T_n сохраняется итоговое значение BER для текущего порога p_i на БС (блоки 4, 5). Далее в случае, если имеются пороги, для которых еще не проходила проверка BER (условие в блоке 6), осуществляется смена порога на БС на следующее значение p_{i+1} в соответствии со значениями порогов, соответствующими фазе работы алгоритма (блок 8). Далее вновь запускается процесс набора статистики для нового порога БС. После получения BER для последнего значения порога происходит выбор лучшего из порогов по критерию минимального значения BER (блок 7) и алгоритм завершает работу (блок 11).

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные исследования показали, что для полномасштабных измерений для расстояний 100 и более метров крайне желательно иметь полигон закрытого типа (помещение) для обеспечения независимости от климатических условий. После рассмотрения и многочисленных проб было принято решение использовать для этих целей здание Технопарка в Сколково. Это сооружение

(рис. 7, 8а) имеет в длину более 300 м, ширину более 50 м с прямой видимостью практически на всю длину и высоту более 20 м.

В ходе испытаний использовалось следующее оборудование: сенсорное устройство (СУ) с приемопередатчиком повышенной дальности, базовая станция с приемопередатчиком повышенной дальности, ноутбук с программным обеспечением для управления системой связи, лазерный дальномер, стандартные антенны и антенны с двойным коэффициентом усиления (см. рис. 2).

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии был использован только алгоритм адаптации порога второго этапа. Точки расположения 1...10 базовой станции в экспериментах показаны на рис. 7. Выходное напряжение логарифмического детектора могло меняться от 0 до 3.3 В. Этому диапазону изменения напряжений на выходе микроконтроллера приемника БС соответствовал диапазон изменения цифровых значений от 0 до 255, среди которых и выбирался порог.

Для проведения измерений было установлено СУ в торце вестибюля здания (рис. 8б). Первоначально БС была установлена в точке 1 (см. рис. 7) на расстоянии 38 м от СУ при наличии прямой видимости между устройствами. Использовались антенны первого типа. Ниже приведены результаты автоматического выбора порога в ходе передачи данных для этого эксперимента:

Порог	145	155	165	154
BER, %	–	0	–	0

Всего в первой группе были произведены измерения для 10 точек расположения базовой станции на расстояниях от 38 до 210 м (рис. 8в, 8г). В экспериментах на расстояниях до 150 м использовали антенны первого типа ($G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 0$ дБ), а на расстояниях больше 150 м – антенны второго типа ($G_{\text{пер}} =$



Рис. 8. Испытания в Сколково: а) здание технопарка (вид сбоку); б) расположение передатчика (СУ); в) зона в Технопарке, по которой перемещалась БС; г) эксперимент при расположении БС в точке 7.

$= G_{пр} = 3$ дБ). Устойчивая связь с $BER < 3 \times 10^{-5}$ фиксировалась до расстояния 200 м (табл. 2). При экспериментах на расстоянии 210 м первичную инициализацию узла произвести не удалось и связь не была установлена.

После этого было высказано предположение, что дальнейшее увеличение дальности может быть обеспечено, если программными методами решить проблему инициализации СУ. При этом отсутствие инициализации могло быть связано как с тем, что СУ не слышит сигнал БС, так и с тем, что БС с неадаптированным порогом пропускает ответ СУ. Для разрешения этой коллизии во второй серии экспериментов дополнительно к адаптации порога во время передачи данных был использован алгоритм адаптации на этапе инициализации, описанный в разд. 4.

Исследования по определению возможности установления связи и оценкам ее качества во второй серии экспериментов проводили по той же схеме, что и в первой серии. Их результаты на расстояниях от 38 до 200 м лишь в деталях отличались от результатов, полученных в первой серии экспериментов. Однако предельная полученная дальность составила уже не 200 м, а 240 м (см. табл. 4, помимо точек 1...10, связь удалось устано-

вить в точках 11 и 12). Эта экспериментальная точка отмечена на рис. 4. Следует, однако, отметить, что в экспериментах использовалась скважность $8/3 = 2.67$, т.е. больше чем на рис. 4а, но меньше чем на рис. 4б.

Использование алгоритма автоматического выбора порога на этапе инициализации положительно сказалось также на увеличении динамического диапазона работы системы по дальности. В первой серии экспериментов наблюдалась неустойчивость в установлении связи на расстояниях менее 5...10 м, что было связано также с нахождением начального порога приемника БС в зоне, где прием сильного сигнала от СУ приводит к ошибкам и препятствует инициализации. Использование алгоритма адаптации при инициализации решает эту проблему. В процессе экспериментов было оценено влияние алгоритма на минимальное расстояние, на котором возможна устойчивая передача данных. Для этого был проведен ряд измерений по передаче данных с уменьшением расстояния между БС и СУ до 1 м. Устойчивая связь при $BER < 3 \times 10^{-5}$ наблюдалась при уменьшении расстояния вплоть до 2 м по сравнению 5...10 м при измерениях без использования алгоритма адаптации на этапе инициализации.

Таблица 2. Качество связи в точках наблюдения

Номер точки наблюдения	Расстояние от БС до СУ, м	КУ антенны, дБ БС; СУ	Автоматически выбранный порог	BER
1	38	0; 0	155	$(0-2) \times 10^{-5}$
2	55	0; 0	155	$(0-2) \times 10^{-5}$
		0; 0	149	$(1-2) \times 10^{-5}$
3	85	3; 0	150	$(0-1) \times 10^{-5}$
		3; 3	153	$< 10^{-5}$
4	105	3; 3	151	$(0-4) \times 10^{-5}$
5	115	3; 3	152	$< 10^{-5}$
6	130	3; 3	151	$< 3 \times 10^{-5}$
7	150	3; 3	151	$< 3 \times 10^{-5}$
8	170	3; 3	151	$< 3 \times 10^{-5}$
9	200	3; 3	149	$< 3 \times 10^{-5}$
			151	$< 2 \times 10^{-5}$
10	210	3; 3	—	—
11	220	3; 3	150	$< 3 \times 10^{-5}$
12	240	3; 3	150	$< 3 \times 10^{-5}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача повышения дальности прямохаотических средств СШП-связи. Проанализированы факторы и проведены теоретические оценки характеристик, определяющих радиус действия канала. Разработана конструкция и изготовлены экспериментальные образцы приемопередатчиков с дальностью действия более 200 м. Подготовлено и апробировано программное обеспечение к ним. Проведены экспериментальные исследования созданных устройств, в которых достигнута дальность связи 240 м.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.А. Лазареву и М.М. Петросяну за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

ФИНИНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Наука, 2002.
2. *Siviak K., McKeown D.* Ultra-Wideband Technology. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
3. *Арслан Х., Чен Чж. Н., Бенедетто М.* Сверхширокополосная беспроводная связь. М.: Техносфера, 2012.
4. Итоговый отчет по программе “Создание программно-аппаратных средств инфокоммуникационной инфраструктуры для малых населенных пунктов на основе подхода сверхширокополосных беспроводных программно-конфигурируемых сетей”. № Госрегистрации 114122470036. М.: Министерство науки и высшего образования РФ, 2015. http://fcpir.ru/participation_in_program/contracts/14.604.21.0036/
5. *Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Попов М.Г.* // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. (РЭНСИТ). 2018. Т. 10. № 2. С. 313.
6. *Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В. и др.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 4. С. 354.
7. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой / Под ред. А.С. Дмитриева и Е.В. Ефремовой. М.: Техносфера, 2019.
8. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд. М.: Вильямс, 2007.
9. *Петрович Н.Т., Размахнин М.К.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Сов. радио, 1969.
10. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
11. *Петрович Н.Т.* Относительные методы передачи информации. М.: Книга, 2003.
12. *Дмитриев А.С., Захарченко К.В., Пузиков Д.Ю.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 3. С. 328.
13. *Кутуза Б.Г., Данильчев М.В., Яковлев О.И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016.