



УДК 621.396.67  
ГРНТИ 78.25.41

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ СО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

*С.Н. РАЗИНЬКОВ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Проведен анализ основных областей применения и определены направления развития систем радиосвязи со сверхширокополосными сигналами. Выполнена оценка прироста показателей интенсивности, скрытности и помехоустойчивости передачи информации по сравнению с альтернативными видами телекоммуникационных систем. Показано, что ввиду высокой пропускной способности и возможностей одновременного обслуживания большого числа абонентов сверхширокополосные радиосистемы целесообразно применять для организации объектовой связи, обмена данными между пространственно распределенными информационно-вычислительными средствами, а также управления радиотехническими комплексами. Определены базовые технологии формирования, передачи-приема и обработки сверхширокополосных сигналов в системах радиосвязи.

*Ключевые слова:* система радиосвязи, сверхширокополосный сигнал, базовые технологии радиосвязи, метод импульсного радио, метод ортогонального частотного разделения каналов.

## THE MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND BASIC TECHNOLOGIES OF RADIO COMMUNICATION SYSTEMS WITH ULTRA-WIDEBAND SIGNALS

*S.N. RAZIN'KOV, Doctor of physico-mathematical sciences, Senior Researcher  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The analysis of the main areas of application and identified areas of development of radio communication systems with ultra-wideband signals. The estimation of the increase in the intensity, stealth and noise immunity of information transmission in comparison with alternative types of telecommunication systems. It is shown that due to the high bandwidth and the possibility of simultaneous service of a large number of subscribers, ultra-wideband radio systems should be used for the organization of object communication, data exchange between spatially distributed information and computing facilities, as well as management of radio engineering complexes. Basic technologies of formation, transmission, reception and processing of ultra-wideband signals in radio communication systems are defined.

*Keywords:* radio communication system, ultra-wideband signal, basic radio communication technologies, pulse radio method, orthogonal frequency channel separation method.

**Введение.** Поиск путей повышения эффективности передачи-приема и обработки информации при неуклонном возрастании требований к скрытности и помехозащищенности радиолиний базируется на использовании сверхширокополосных (СШП) сигналов. В соответствии с решением Федеральной комиссии связи США USA (FCC) – Federal Communication Commission и нормативными документами, регламентирующими развитие информационно-телекоммуникационных сетей стран Европейского союза ETSI – European Telecommunications Standarts Institute, к классу СШП относятся сигналы, эквивалентные размеры спектров которых превышают 500 МГц или 50 % от значения центральной частоты [1].



Высокая скорость обмена сообщениями в СШП радиосетях обусловлена тем, что для передачи бита информации используется один импульс, в то время как в узкополосных системах для получения аналогичного результата требуется более 10 периодов несущего колебания [2]. Согласно теореме Шеннона, пропускная способность канала связи повышается с увеличением его полосы пропускания и отношения сигнал-шум на входе приемного устройства [1]; поэтому при ширине полосы частот канала 1 ГГц ее потенциальное значение может достигать 1 Гбит/с [3].

Энергетическая скрытность систем СШП радиосвязи определяется крайне низкой (порядка  $10^{-4} \dots 10^{-2}$  мВт/МГц) спектральной плотностью мощности излучаемых сигналов, затрудняющей их обнаружение и распознавание средствами мониторинга [3, 4].

Помехозащищенность радиолиний, характеризуемая коэффициентом усиления обработки, представляющим собой отношение ширины полосы канала к ширине полосы информационного сигнала [3], обеспечивается вследствие распределения энергии сигналов в диапазоне частот, позволяющего осуществлять фильтрацию помех [4], а при малой мощности выполнять их компенсацию методами корреляционной обработки [3, 5]. Коэффициент усиления обработки сигнала с шириной полосы частот 10 кГц, передаваемого по радиоканалу, занимающем полосу частот 2 ГГц, составляет 53 дБ, что на 26 дБ превышает показатель, достижимый в системах с расширением спектра, где для передачи сообщений используются каналы с шириной полосы до 5 МГц. Вследствие отсутствия в спектрах сигналов сосредоточенных составляющих большой интенсивности затруднено подавление СШП радиолиний прицельными по частоте преднамеренными (организованными) помехами с рациональным распределением спектральной плотности мощности, а для постановки маскирующих помех требуются значительные энергетические ресурсы [3–5].

**Актуальность.** Теоретические основы организации СШП радиосвязи и научно-обоснованные технические решения по построению алгоритмов и устройств передачи-приема и обработки СШП сигналов представлены в трудах д.т.н. Авдеева В.Б., Воскресенского Д.И., Иммореева И.Я., Трифонова А.П., Трифонова П.А., д.ф.-м.н. Корчагина Ю.Э., Потапова А.А., Чернышева С.Л. и ряда других специалистов. В [1, 2] с позиций системного анализа обоснованы принципы построения и технические характеристики беспроводных СШП сетей передачи информации; в [5–8] исследованы рациональные пути создания аппаратуры СШП радиосвязи в соответствии с современными требованиями к информационно-телекоммуникационным системам.

Вместе с тем, виду широкой номенклатуры средств, работа которых базируется на использовании СШП сигналов, приобретает актуальность задача определения областей их наиболее рационального применения, а также систематизации и установления приоритетов разработок по указанной тематике.

В интересах решения данной задачи в предлагаемой работе обоснованы перспективные направления развития и базовые технологии создания систем СШП радиосвязи.

**Основные направления развития систем радиосвязи с СШП сигналами.** Исходя из тенденции неуклонного роста информационных потребностей и задач информационного обеспечения абонентов информационно-телекоммуникационных сетей [1, 6–8], установлено, что в настоящее время основные направления развития СШП радиосвязи должны ориентироваться на создание и совершенствование радиосистем следующих классов [6, 7]:

глобальные (WWAN – Wireless Wide Area Network) и региональные (WMAN – Wireless Metropolitan Area Networks) системы (сети) передачи данных. Эти системы характеризуются дистанциями связи до 0,1...10 км и значениями скорости информационного обмена свыше 0,1 Мбит/с; вследствие низкого уровня излучаемой мощности в процессе их эксплуатации не требуется резервирование частотного ресурса [6–8]. Указанные факторы определяют перспективность применения систем WWAN и WMAN для скрытной передачи голосовых сообщений и команд управления роботизированными комплексами военного и гражданского



назначения, в том числе беспилотными летательными аппаратами ближнего действия и малой дальности [6];

локальные (объектовые) системы сети связи (WLAN – Wireless Local Area Network). Такие системы обеспечивают передачу данных на расстояния 10...100 м со скоростью 0,1...100 Мбит/с [7, 8]. Они эффективно используются для обмена сообщениями между абонентами, сосредоточенными на ограниченной территории в урбанизированной местности, и составляют техническую основу систем управления промышленным (строительным) оборудованием, а также систем трансляции информации с информационно-вычислительных устройств на компьютерные центры ее сбора, обработки и хранения;

персональные системы информационного обмена между пространственно распределенными информационно-вычислительными устройствами. Такие системы предназначены для коммутации компонентов, расположенных на удалении порядка 10 м; достижимая скорость передачи информации превышает 100 Мбит/с [6–8].

**Базовые технологии создания систем радиосвязи с СШП сигналами.** Перечень базовых технологий создания систем радиосвязи с СШП сигналами разработан по результатам анализа требований к эффективности решения задач обеспечения информационного обмена, защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа и дестабилизирующих информационно-технических воздействий. Применительно к системам СШП радиосвязи он включает в себя:

технологию генерации СШП сигналов со стабильными частотно-временными параметрами;

технологию излучения СШП сигналов при нормативных ограничениях на уровень пиковой (средней) мощности;

технологии приема и пространственно-временной обработки СШП сигналов на фоне помех.

**Технология генерации СШП сигналов со стабильными частотно-временными параметрами** базируется на сжатии импульсов с высокими значениями амплитуд для сосредоточения их энергии на малом интервале времени [8, 9].

Как показано в [9], данная процедура может осуществляться с применением трех способов:

первый способ – накопление энергии в электростатических резонаторах, выполненных из сверхпроводящих материалов, с малым временем разрядки;

второй способ – возбуждение антенн с коэффициентами усиления, возрастающими пропорционально текущему значению частоты рабочего диапазона в степени не выше 2 [8, 10], импульсами сверхкороткой длительности;

третий способ – модуляция гармонических процессов последовательностями коротких низкочастотных импульсов. Требуемые значения ширины спектра сигнала обеспечиваются за счет выбора длительности модулирующих импульсов; спектральная плотность мощности излучения может быть снижена при увеличении частоты их повторения [2]. В целях реализации функций динамического управления спектром сигнала, имеющих важное значение для организации работы систем радиосвязи с множественным доступом абонентов [1, 2] и рационального использования частотного ресурса с исключением полос частот, занятых узкополосными радиосистемами, используются модулирующие псевдослучайные последовательности импульсов с временным сдвигом [6, 7].

**Технология излучения СШП сигналов при нормативных ограничениях на уровень пиковой (средней) мощности** базируется на применении двух видов антенных систем:

первый вид – диапазонные антенны с коэффициентами усиления, возрастающими пропорционально текущему значению частоты спектра сигнала в степени не выше 2, и коэффициентами стоячей волны не более 1,2, обеспечивающими согласование с распределительными линиями в диапазоне частот [9];



второй вид – антенные решетки частотно-независимых элементов с быстродействующими коммутирующими ключами, характеризуемые неизменным положением главных лучей и низким уровнем боковых лепестков парциальных диаграмм направленности [11] в диапазоне рабочих частот.

Согласно [10], наибольший уровень излучаемой энергии достигается при возрастании парциального момента передачи-приема сигнала по мере увеличения текущего значения частоты в его спектре по линейному закону. В радиоканалах с антеннами, обладающими постоянными коэффициентами усиления, уровни передаваемых сигналов повышаются за счет увеличения коэффициента усиления передающей антенны и эффективной площади приемной антенны. Энергия сигнала, для передачи-приема которого применяются антенны с зависимостями парциальных коэффициентов усиления от частоты в виде степенных функций, возрастает за счет выбора средних значений парциальных коэффициентов усиления антенн и показателей степенных функций их зависимостей от текущего значения частоты, обеспечивающих увеличение энергетического момента радиоканала. При зависимости произведения парциальных коэффициентов усиления антенн от частоты в виде степенной функции с показателем степени 2 дальность и скорость передачи сообщений в радиоканале увеличиваются за счет повышения этих коэффициентов, усредненных в диапазоне рабочих частот. При показателе степенной функции, отличном от 2, указанные характеристики возрастают за счет увеличения средних значений коэффициентов усиления и коэффициента перекрытия диапазона рабочих частот антенн. Скорость передачи СШП сигналов возрастает пропорционально увеличению коэффициентов усиления антенн на центральной циклической частоте и ширине диапазона рабочих частот.

Уровень излучения при использовании антенных решеток обеспечивается за счет синхронного сложения в пространстве сигналов их элементов; точность синхронизации сигналов определяется быстродействием коммутирующих ключей [9]. В результате достигается высокий энергетический потенциал радиоканала при эксплуатационных ограничениях на уровни мощности генерируемых сигналов и устраняются технические проблемы, связанные с формированием высоковольтных напряжений на входе антенной системы [1].

**Технология пространственно-временной обработки СШП сигналов** базируется на бездетекторном приеме [1, 3] на интервалах времени, длительность которых выбирается из условия достижения требуемой степени защиты от импульсных помех [5]. Вследствие исключения операций преобразования сигнала по частоте в процессе обработки устраняются принципиальные ограничения на ширину занимаемой им полосы частот.

Качественные отличия пространственно-временной обработки СШП сигналов от обработки, осуществляемой в узкополосных системах, заключается в следующем.

1. Обработка СШП сигналов не может быть разделена на независимые процедуры их приема (пространственной обработки в антенной системе), обнаружения-оценки параметров (временной обработки в приемном устройстве). Поэтому антенную систему и приемник следует рассматривать в виде интегрированного приемного устройства с пространственно-избирательной передаточной функцией. Частотно-угловое распределение обрабатываемых сигналов определяется формой парциальных диаграмм направленности передающих и приемных антенн, а энергетические коэффициенты усиления антенн, характеризующие степень превышения изучаемой (принимаемой) энергии относительно гипотетической изотропной антенны, зависят от вида и параметров передаваемых сигналов [11].

2. При обработке СШП волновых процессов вторичные излучения локальных источников на трассах распространения, поступающие на вход приемника с задержками, идентифицируются как случайные помехи. Поэтому принимаемый сигнал сохраняет инвариантность формы, однако вследствие интерференции с отраженными сигналами возникают ошибки оценивания его частотно-временных параметров, затрудняющие реализацию алгоритмов оптимальной обработки [1, 4].



Базовыми устройствами обработки СШП сигналов являются [1, 3, 5]:

- квазиоптимальные фильтры;
- многоканальные корреляторы;
- вейвлет-фильтры.

При построении квазиоптимальных фильтров выполняется согласование с ожидаемыми сигналами по отдельным параметрам (например, полосе частот, минимальной и максимальной границам спектров). Данный подход снимает жесткие требования к априорной информации о полном наборе параметров сигналов, устанавливаемые для устройств оптимальной обработки. По мере уменьшения рассогласования принимаемого и ожидаемого сигналов показатели эффективности устройства по обнаружению и техническому анализу приближаются к характеристикам оптимального (согласованного) фильтра.

В основе работы многоканальных корреляторов лежит формирование множества дискретных отсчетов сигналов на интервале времени обнаружения. Реализация указанных устройств затруднена для обработки сверхкоротких импульсов (длительностью до 1нс) ввиду необходимости применения большого числа корреляторов, что приводит к значительным массогабаритным характеристикам аппаратуры.

Обработка сигналов в вейвлет-фильтрах базируется на анализе их свойств в частотной и временной областях. За счет представления частоты и времени в качестве независимых переменных двумерной характеристической функции сигнала обеспечиваются возможности исследования динамики его спектрального состава, что позволяет выявлять наиболее интенсивные спектральные компоненты при быстрых изменениях во времени [3]. По результатам анализа локальных свойств спектра может выполняться в реальном масштабе времени обнаружение СШП сигналов длительностью менее 1 нс [5].

Для защиты от узкополосных помех в устройствах приема СШП сигналов наиболее эффективно применяется компенсационный метод повышения отношения сигнал-помеха [5]. Его суть заключается в компенсации помехи путем сложения со специально созданными противофазными сигналами. Основным компонентом компенсатора помех является фазовращатель на основе линии задержки, дисперсионной линии задержки или программируемого трансверсального фильтра [3].

При использовании дисперсионной линии задержки в сочетании с пороговым обнаружителем достигается максимальная пропускная способность СШП радиосистемы при отношении сигнал-помеха на входе приемника до -30...40 дБ при требуемом соотношении энергии сигнала и спектральной плотности мощности помехи на выходе устройства обработки более 10 дБ. За счет включения вейвлет-фильтра помехозащищенность приемного устройства дополнительно повышается на 10...12 дБ, что создает условия уверенного приема сигналов, энергия которых не превышает уровень собственных шумов приемника [3].

**Заключение.** Проведен анализ основных видов систем радиосвязи с СШП сигналами, на основе которого определены перспективные направления их развития и базовые технологии создания.

В настоящее время наибольшие перспективы развития определены для системы (сети) связи (передачи данных) типа WMAN, WWAN, WLAN и систем информационного обмена между пространственно распределенными информационно-вычислительными средствами типа WPAN. Дальность действия систем СШП радиосвязи и скорость передачи данных, обеспечивающие удовлетворение информационных потребностей абонентов, обеспечиваются за счет рационального выбора рабочих частот и реализации базовых технологий передачи-приема и обработки сигналов.

Основу для построения систем СШП радиосвязи составляют базовые технологии генерации СШП сигналов со стабильными частотно-временными параметрами, их излучения при нормативных ограничениях на уровень мощности и пространственно-временной обработки на фоне помех.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015. 481 с.
2. Вишневецкий В.И., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
3. Агейкин В.И., Каплярчук Л.М., Степанов А.П. К вопросу использования технологии сверхширокополосных сигналов в интересах создания перспективных средств связи, разведки и РЭБ тактического звена управления // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации. М.: МО РФ, 2017. С. 40–44.
4. Радзиевский В. Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
5. Семерунин Д.М., Агейкин В.И., Степанов А.П. О проблемах и возможных способах построения устройств обнаружения импульсных сверхширокополосных сигналов в интересах создания перспективных комплексов разведки и РЭБ // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации. М.: МО РФ, 2018. С. 64–66.
6. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2004. 168 с.
7. Урядников Ю.Ф., Аджемов С.С. Сверхширокополосная связь. Теория и применение. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 213 с.
8. Разиньков С.Н., Никитин Р.О., Любавский А.П. Области применения и пути совершенствования систем радиосвязи со сверхширокополосными сигналами // Электросвязь, 2018. № 7. С. 18–22.
9. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 1: Поляризационная структура радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2005. 704 с.
10. Любавский А.П., Разиньков С.Н. Спектральные энергетические уравнения и оценка скорости передачи сверхширокополосных сигналов в радиоканалах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика и математика, 2017. № 2. С. 21–30.
11. Разиньков С. Н. Спектральные энергетические уравнения передачи негармонических сигналов и их применение в сверхширокополосных радиосистемах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2011. Т. 14. № 3. С. 12–17.

REFERENCES

1. Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. Sverhshirokopolosnye impul'snye radiosistemy. Novosibirsk: Nauka, 2015. 481 p.
2. Vishnevskij V.I., Lyahov A.I., Portnoj S.L., Shahnovich I.V. Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informacii. M.: Tehnosfera, 2006. 288 p.
3. Agejkin V.I., Kaplyarchuk L.M., Stepanov A.P. K voprosu ispol'zovaniya tehnologii sverhshirokopolosnyh signalov v interesah sozdaniya perspektivnyh sredstv svyazi, razvedki i R'EB takticheskogo zvena upravleniya // Radio`elektronnaya bor'ba v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii. M.: MO RF, 2017. Pp. 40–44.
4. Radzievskij V. G., Trifonov P.A. Obrabotka sverhshirokopolosnyh signalov i pomeh. M.: Radiotekhnika, 2009. 288 p.
5. Semerunin D.M., Agejkin V.I., Stepanov A.P. O problemah i vozmoznyh sposobah postroeniya ustrojstv obnaruzheniya impul'snyh sverhshirokopolosnyh signalov v interesah sozdaniya perspektivnyh kompleksov razvedki i R'EB // Radio`elektronnaya bor'ba v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii. M.: MO RF, 2018. Pp. 64–66.
6. Shahnovich I.V. Sovremennye tehnologii besprovodnoj svyazi. M.: Tehnosfera, 2004. 168 p.
7. Uryadnikov Yu.F., Adzhemov S.S. Sverhshirokopolosnaya svyaz'. Teoriya i primenenie. M.: SOLON-Press, 2005. 213 p.



8. Razin'kov S.N., Nikitin R.O., Lyubavskij A.P. Oblasti primeneniya i puti sovershenstvovaniya sistem radiosvyazi so sverhshirokopolosnymi signalami // `Elektrosvyaz', 2018. № 7. Pp. 18–22.
9. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. Polyarizaciya radiovoln. Kn. 1: Polyarizacionnaya struktura radiolokacionnyh signalov. M.: Radiotekhnika, 2005. 704 p.
10. Lyubavskij A.P., Razin'kov S.N. Spektral'nye `energeticheskie uravneniya i ocenka skorosti peredachi sverhshirokopolosnyh signalov v radiokanalakh // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i matematika, 2017. № 2. Pp. 21–30.
11. Razin'kov S. N. Spektral'nye `energeticheskie uravneniya peredachi negarmonicheskikh signalov i ih primenenie v sverhshirokopolosnyh radiosistemah // Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy, 2011. T. 14. № 3. Pp. 12–17.

© Разиньков С.Н., 2019

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, razinkovsergey@rambler.ru.