

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ. ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Дубровин В. С., Колесникова И. В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск
Тел. +7(834-2) 29-07-86, e-mail: dvs8937@saransk.ru

Аннотация. В статье приводится сравнение системы радиосвязи на основе сверхширокополосных сигналов с существующими системами, обеспечивающими радиодоступ к локальным и подвижным абонентам. Описаны преимущества и области применения СШП технологии.

Ключевые слова: сверхширокополосные системы, СШП-сигналы, СШП- связь, беспроводные локальные сети.

Введение

В условиях информационного конфликта эффективность систем передачи информации в значительной степени зависит от качества функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) [1], к которым предъявляются [2] всё более высокие требования (повышение помехоустойчивости, скрытность, электромагнитная совместимость и т.д.).

Для выполнения поставленных требований разработчики РЭС идут либо по пути улучшения технических характеристик узкополосных систем, либо используют новые технологии, основанные на применении сверхширокополосных сигналов (СШПС). Системы с СШПС могут более успешно, чем узкополосные, решать следующие задачи: обнаружение и распознавание объектов (радиолокация); повышение объёма и скрытности передачи данных в радиосвязи; увеличение точности местоопределения в навигации.

Интенсивные разработки устройств СШП радиоэлектроники велись с середины 1970-х годов, однако их практическая реализация стала возможной только после достижения соответствующего уровня следующих технологий [1]:

- технологии генерации мощных сверхкоротких импульсов с практически неограниченным ресурсом, с высокой стабильностью и большой частотой повторения;
- технологии излучения таких импульсов непосредственно в пространство (СШП антенная техника);
- технологии скоростной цифровой обработки больших массивов информации (вычислительная техника).

Технические особенности систем радиосвязи на основе сверхширокополосных сигналов

В системах радиосвязи (РС) переход на СШПС, в соответствии с известной формулой Шеннона, даёт возможность значительно увеличить скорость передачи информации. При передаче дискретной информации максимальная скорость

$$C=W \cdot \log_2[1+P/N_0], \quad (1)$$

где W – частотная полоса канала связи;

P – мощность сигнала на входе приёмника;

N_0 – спектральная плотность нормальных аддитивных шумов, равномерная во всей полосе канала.

Таким образом, основным способом увеличения скорости (информативности) системы является расширение полосы частот или, что тоже самое, уменьшение его длительности.

Принцип формирования сверхширокополосного сигнала с управляемой шириной спектра можно рассмотреть на примере импульсной модуляции с ультракороткими импульсами гауссовой формы [3]:

$$S_g(t) = A \cdot [1 - 4\pi (t/\tau)^2] \cdot \exp[-2\pi (t/\tau)^2], \quad (2)$$

где A — амплитуда сигнала, τ — его длительность. Такая форма сигнала обеспечивает нулевую постоянную составляющую. Спектр такого импульса определяется следующим выражением:

$$S_g(f) = A \cdot \sqrt{2} \pi \tau (\tau f)^2 \cdot \exp[-\frac{\pi}{2} (\tau f)^2]. \quad (3)$$

Такой одиночный импульс является широкополосным сигналом с центральной частотой и шириной полосы, которые полностью определяются его длительностью. Его центральная частота обратно пропорциональна длительности импульса. Спектральная плотность мощности такого сигнала оказывается очень мала (поскольку мощность сигнала распределена в широком диапазоне частот) и напоминает обычный шумовой фон [4]. За счёт изменения длительности импульса τ можно управлять шириной спектра сигнала, а за счёт уменьшения периода повторения импульсов T — снижать уровень усреднённой спектральной плотности мощности сигнала, чтобы не создавать помех другим приёмным системам, чьи диапазоны перекрывают спектр импульса.

Подобная технология не избавлена от некоторых существенных недостатков: негибкость управления спектром излучаемого сигнала; на частотах, кратных $1/T$, возникают острые и высокие максимумы в спектральной плотности мощности. Для более эффективного использования диапазона передачи данных можно осуществить, например, с помощью широкополосных радиоимпульсов. При этом вся используемая разрешённая полоса разбивается на поддиапазоны, и в каждом из них выбираются свои параметры импульса, для исключения перекрытия соседних поддиапазонов.

К сигналам, которые могут использоваться в СШП системах, относятся [5]:

1. Ультракороткие импульсы;
2. Короткие радиоимпульсы — цуги колебаний;
3. Хаотические радиоимпульсы;
4. Пачки коротких импульсов;
5. Сигналы с прямым расширением спектра;
6. Сигналы с ортогонально-частотным мультиплексированием (OFDM);
7. Сверхширокополосные сигналы на основе частотной модуляции (FM UWB);

Любая сверхширокополосная система связи включает [6]: антенную систему, формирующую короткие электромагнитные импульсы; мощный импульсный ключ, управляющий антенной системой; устройство модуляции/демодуляции; прецизионный высокочастотный опорный генератор и коррелятор.

В такой системе нет мощных усилителей; приёмник — без гетеродина и частотных фильтров; устройства детектирования и модуляции/демодуляции реализуются на базе GaAs и Si-Ge интегральной технологии гигагерцового диапазона; антенны достаточно просты и могут изготавливаться на печатных платах. Однако требования к коммутирующим элементам достаточно жёсткие — такие импульсные ключи должны открываться (закрываться) на сотни пикосекунд и иметь фронты с длительностью порядка 10-100 пс с мегагерцовой частотой повторения при очень высокой стабильности. При этом коммутируемое напряжение может достигать сотен вольт и киловольт.

Спектр короткого импульса достаточно широк, поэтому в отличие от технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), системы радиосвязи на базе СШПС используют ортогональные псевдослучайные последовательности (ПСП) не для расширения спектра сигнала, а только для сглаживания его спектральной характеристики, формирования отдельных каналов связи и защиты от помех.

Приёмное устройство такой системы представляет собой синхронный приёмник без промежуточного преобразования частоты с системой ФАПЧ, где вместо гармонического

колебания гетеродина используется импульсная последовательность, позволяющая выбрать необходимый канал связи. Корреляционный детектор, входящий в состав приёмного устройства, способствует тому, что узкополосная помеха от передатчика с непрерывной несущей или сигнал от другого импульсного передатчика могут помешать приёму отдельных импульсов, но не информационному биту в целом [6].

Определение и классификация сверхширокополосных сигналов

В литературе иногда можно встретить не вполне удачные названия СШП сигналов: “несинусоидальные”, “негармонические”, “нестационарные”, “сигналы без несущей”, “моноимпульсные”, “время-импульсные”, короткоимпульсные”, и т. п. [2, 7].

Сегодня существует несколько отличающихся друг от друга определений СШП сигнала, введенных различными организациями в разных странах мира. Источником различий служит величина η (показатель широкополосности) и метод нахождения – средней (f_0), минимальной (f_{\min}) и максимальной (f_{\max}) частоты функции спектральной плотности (ФСП) одномерного преобразования Фурье (ОПФ) $S(jf)$ данного сигнала $s(t)$.

Под СШП сигналом понимают сигнал, показатель широкополосности η которого задается следующим соотношением [8]:

$$\eta = \Delta f / f_0 = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}), \quad (1)$$

где f_0 , f_{\min} , f_{\max} – средняя, минимальная и максимальная частоты функции спектральной плотности (ФСП) одномерного преобразования Фурье (ОПФ) $S(jf)$ данного сигнала $s(t)$;

$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ – ширина полосы частот сигнала.

Известно [9] несколько отличное определение относительной полосы частот η :

$$\eta = (f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}), \quad (2)$$

в соответствии, с которым системы или сигналы, имеющие $\eta \leq 0,01$ отнесены к узкополосным, $0,01 < \eta \leq 0,25$ – к широкополосным, $0,25 < \eta \leq 1$ – к сверхширокополосным. Однако анализ работ, связанных с построением СШП систем показывает, что расширение полосы частот повышает информативность системы в том случае, когда пространственная протяженность сигнала $c\tau$ (c – скорость света, $\tau = 1/\Delta f$ – длительность простого сигнала, Δf – ширина спектра сигнала) становится намного меньше L – размера излучающей (приемной) апертуры или размера объекта, отражающего сигнал.

Поэтому независимо от используемого термина более точное и физически обоснованное разграничение сигналов и систем по ширине полосы частот дает [10] следующее определение: система или сигнал являются узкополосными (при $L/c\tau \ll 1$); широкополосными (при $L/c\tau \approx 1$); сверхширокополосными (при $L/c\tau \gg 1$). Это определение связывает понятие ширины полосы системы непосредственно с размерами ее антенны или облучаемого объекта.

Сравнительные характеристики беспроводных систем связи

Радиодоступ к локальным и подвижным абонентам может быть реализован на основе:

1. Систем сотовой связи.
2. Системы DECT.
3. Систем транкинговой связи.
4. Беспроводных локальных сетей.

Применение систем сотовой связи в качестве систем передачи информации следует считать экономически неэффективным. Системы DECT являются низкоскоростными или имеют небольшой радиус зоны обслуживания. Также неэффективными являются системы транкинговой связи, т.к. обладают большой избыточностью при обслуживании стационарных абонентов.

Беспроводные локальные сети могут строиться на основе стандартов семейства IEEE 802.11-802.16

Сравнительные технические характеристики СШП устройств и других систем с малым радиусом действия приведены в таблице 1 [7].

Таблица 1. Сравнительные технические характеристики СШП устройств и других систем

Тип устройства	Скорость передачи данных	Радиус зоны обслуживания, м	Диапазон частот, ГГц	Уровень мощности	Тип модуляции
СШП	До 500 Мбит/с	15	1-11	-30...40 дБм/МГц	PPM/ другой тип
Bluetooth	722 кбит/с	15	ISM 2, 4	Класс 1: 20дБм Класс 2: 4дБм Класс 3: 0 дБм	GMSK
ZigBee	20 кбит/с 40 кбит/с 250кбит/с	>20 >20 >20	0,868-0,8686 0,902-0,928 2,4-2,4835		
802.11a, WLAN	До 54 Мбит/с	50	5	От 200 мВт до 1 Вт	64-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM
802.11b, WLAN	До 11 Мбит/с	100	ISM 2, 4	От 100 мВт до 2 Вт	ССК (8 Complex Chip Spreading)
802.11g, WLAN	До 54 Мбит/с	100	ISM 2, 4	От 100 мВт до 2 Вт	64-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM

Стандарт 802.15.1 (Bluetooth) обеспечивает скорость передачи информации в канале 720 кбит/с., при этом обеспечивается существенно меньшее энергопотребление, чем у устройств стандарта 802.11 [7]. Технология стандарта Bluetooth позволяет объединять в пикосети до восьми устройств, обеспечивать реализацию беспроводного ввода, организации каналов связи для различных устройств и временных локальных сетей. Спецификация стандарта описывает пакетный способ передачи информации с временным мультиплексированием. Для радиообмена используется диапазон частот 2400 – 2483,5 МГц. В радиотракте предусмотрен метод расширения спектра посредством частотных скачков и двухуровневая частотная модуляция [11].

Технология Bluetooth имеет недостатки, связанные с реализованным в ней механизмом защиты от несанкционированного доступа. В процессе сопряжения два Bluetooth-устройства формируют защищенный 128-битный ключ, который затем хранится в их памяти и используется каждый раз при пересылке данных между двумя устройствами. В качестве первого шага идентификации для установления связи пользователю необходимо ввести в оба устройства одинаковый четырехсимвольный PIN-код. Затем из него сложными математическими процедурами извлекается ключ.

Примером возможности взлома является искусственно инициированный ключ сопряжения. Bluetooth-устройство хакера вмешивается в контакт, выдавая себя за другое. При этом на устройство жертвы посылалось сообщение о том, что ключ забыт [12]. Старый ключ аннулировался, а устройства начинали процедуру сопряжения вновь, что позволяло хакеру перехватить полноценный пароль и использовать его впоследствии в своих целях. Кроме того, нельзя исключать возможность возникновения радиопомех, поскольку диапазон

2,4 ГГц, в котором работают средства Bluetooth, используется и беспроводными ЛВС стандарта 802.11.

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) используется для решения спектра задач достаточно низкой скорости передачи и разрабатывался исходя их требований создания систем с изменяющейся сетевой структурой, малой стоимости и малого энергопотребления входящего в сеть оборудования. Он предусматривает работу в трех диапазонах частот: один канал 896,0 – 868,6 МГц (для Европы), 10 каналов в диапазоне 902 – 928 МГц, и 16 каналов в диапазоне 2400 – 2483,5 МГц. Для предотвращения несанкционированного доступа к передаваемым данным может применяться шифрование (криптозащита). Применение криптозащиты требует значительной вычислительной мощности от микроконтроллерного блока, как на приемной, так и на передающей стороне.

Структура стандарта IEEE 802.11 для беспроводных локальных компьютерных сетей предполагает наличие в своем составе точек доступа к проводной сети общего пользования и большого количества абонентских станций, между которыми обеспечивается беспроводная связь и связь через точки доступа с абонентами проводной сети. Стандарт 802.11 предусматривает две длины ключей — 40 бит и 104 бита.

При длине ключа в 104 бита декодирование данных прямым перебором становится довольно утомительным занятием даже при работе новейшей вычислительной техники. На первый взгляд, реализованный в WEP (Wired Equivalent Privacy – безопасность, эквивалентная проводной) механизм криптозащиты должен быть устойчив ко взлому. Но отправитель и получатель должны обладать секретным ключом, используемым вместе с вектором инициализации для кодирования и декодирования информации. А в стандарте 802.11b не оговорен механизм обмена ключей между сторонами.

В результате, при интенсивном обмене данными, реальна ситуация повторного использования значений векторов инициализации с одним и тем же секретным ключом. Особенность реализованного алгоритма криптозащиты приводит к тому, что, имея два сетевых пакета, зашифрованных одним кодирующим ключом, можно не только расшифровать данные, но и вычислить секретный ключ. Это позволяет не только декодировать всю перехваченную информацию, но и имитировать активность одной из сторон. Тонкость работы с алгоритмом кодирования, реализованном в WEP, в том, что нельзя допускать повторного использования кодирующих ключей. И этот момент был упущен при разработке стандарта [1].

Стандарт 802.16 разработан для описания радиointерфейса, основанного на общем протоколе (MAC) доступа к общему каналу. Стандартом предусматривается диапазон частот 2 – 11 ГГц и 10 – 66 ГГц. В диапазоне частот 10 – 66 ГГц радиосвязь между абонентами возможна лишь в условиях прямой видимости. В диапазоне 2 – 11 ГГц допускается возможность решения задач радиосвязи в условиях многолучевого распространения и при отсутствии прямой видимости.

В соответствии со стандартом IEEE 802.16, для предотвращения несанкционированного доступа к беспроводным службам и защиты пользовательских данных в Nateks-Multilink 3 осуществляется шифрование трафика в пределах всей беспроводной сети. Базовые станции передают данные о ключах (DES/3DES) на абонентские комплексы с помощью протокола обмена ключами безопасности (Privacy Key Management, PKM).

Этот протокол используется базовой станцией для предоставления условного доступа к сети и во время синхронизации информации о ключах с абонентской стороной. Авторизация абонентских комплексов осуществляется на базе сертификата X.509. В системе предусмотрена защита паролем (до 16 различных символов) доступа к интерфейсу GUI-управления. Таким образом, обеспечивается защита служб управления, конфигурирования и обновления паролей и программного обеспечения системы. В Nateks-Multilink 3 встроены дополнительные средства защиты, которые запрещают неопознанной удаленной станции

посылать данные на порт Ethernet другой удаленной станции Nateks-Multilink 3. В результате уменьшается вероятность утечки данных с подключенного сегмента локальной сети.

Требования к скорости передачи информации, ее защищенности, стоимости и потребляемой мощности в современных устройствах передачи данных, а также загруженность радиочастотного спектра требуют создания новых технологий, обеспечивающих более экономичное применение радиочастотного ресурса и высокую помехозащищенность. Использование таких беспроводных технологий, как Bluetooth, ZigBee или протоколы семейства 802.11и 802.16, имеет ряд ограничений. Главный недостаток этих протоколов заключается в их сравнительно небольшой полосе пропускания и алгоритмах защиты информации.

Применение СШП-технологии в системах связи

Альтернативной технологией беспроводного доступа, обеспечивающей обмен данными по радиоканалу между периферийными устройствами ПК и мобильными устройствами на небольших расстояниях с очень высокой скоростью и малыми затратами энергии, является сверхширокополосная (СШП) технология Ultra Wide Band (UWB). За счет широкого радиочастотного диапазона технология UWB позволяет передавать по беспроводному каналу на небольшие расстояния (например, в пределах дома или небольшого офиса) значительно большие объемы данных и за меньшее время, чем традиционные беспроводные технологии. В сочетании с малым энергопотреблением и импульсным характером передачи данных это позволяет достигать высокой скорости передачи данных без помех со стороны оборудования других применяющихся сегодня беспроводных стандартов, таких как Wi-Fi, WiMAX и стандарты сотовой связи [14].

Интерес к созданию систем передачи информации с СШП сигналами обусловлен рядом преимуществ, которыми они обладают по сравнению с существующими системами связи. Одним из основных преимуществ является скрытность и устойчивость к подавлению. Приемники обычных радиосистем воспринимают СШП сигнал как случайные помехи, которые к тому же нередко оказываются и по амплитуде полностью скрыты в естественных шумах. Различные же сверхширокополосные системы используют разные алгоритмы построения кодирующих псевдослучайных последовательностей, общее число которых, в принципе весьма велико. Поэтому случайные совпадения кодов у разных систем практически исключены, а целенаправленный подбор кода представляет собой весьма сложную задачу [15]. Даже если принцип обнаружения СШП передачи будет известен, трудно будет выполнить систему подавления из-за широкой полосы рабочих частот.

Характерной особенностью, присущей системам связи на основе СШПС, является высокая электромагнитная совместимость с существующими системами связи. Малые уровни сигналов, использование кодирования и шумоподобная структура СШП систем практически не создает помех для других устройств, что позволяет в большинстве случаев работать на безлицензионной основе.

Теоретически системы передачи информации с СШП сигналами должны иметь высокую скорость передачи информации. В традиционных системах рабочая частота и ширина отведенной полосы спектра в основном определяют пропускную способность канала связи, а мощность передатчика - ее дальность. В СШП два этих понятия тесно взаимосвязаны, позволяя перераспределять имеющиеся возможности между дальностью связи и скоростью передачи [15].

Расширение полосы канала связи, переход к каналам со сверхширокой полосой дает возможность практически неограниченного увеличения числа каналов связи. Заранее распределив сигналы (их частоты, виды модуляции и пр.) между абонентами, можно обеспечить независимую в смысле взаимного прослушивания и взаимных помех связь между ними. При этом многоканальная, но разделенная во времени связь не требует увеличения мощности передатчика, тогда как одновременная передача независимой

(разной) информации нескольким абонентам потребует увеличения этой мощности или сокращение скорости передачи информации.

Еще одним преимуществом данной системы по сравнению с обычными узкополосными является их слабая чувствительность к искажениям в условиях многолучевого распространения радиоволн. Данный эффект, обусловленный поступлением на приемную антенну как прямого сигнала от передатчика, так и сигналов, отразившихся от окружающих предметов, являются одним из важнейших факторов, ухудшающих условия радиоприема в любых системах. Образование искажений в таких каналах связано с наложением одного сигнала на другой с примерно равной амплитудой, но отличающегося по фазе. В результате происходит частичное или полное подавление одного луча другим. В настоящее время ни одна из традиционных технологий не способна бороться с отраженными сигналами, имеющими задержку в единицы наносекунд.

Для передачи в СШП системах применяются очень короткие импульсы, поэтому не возникают и межсимвольные искажения – энергия принятого импульса практически всегда успевает фактически полностью затухнуть до момента прихода его следующей копии.

Важнейшим критерием, характеризующим эффективность систем беспроводной связи, является высокая потенциальная удельная плотность передачи данных. Она определяется как величина достижимой суммарной скорости передачи данных на один квадратный метр рабочей зоны и имеет размерность «бит/с/м²». СШП системы имеют на сегодняшний день значение этого показателя – порядка 1 Мбит/с/м². Масштабность этой величины становится более ясной, если, например, указать, что у Bluetooth аналогичный параметр составляет [15] всего 30кбит/с/м².

Преимущества СШП систем позволяют применять их [15] в следующих областях:

Телекоммуникация. Здесь могут создаваться устройства как для работы внутри помещений, так и для связи на значительные расстояния. СШП устройства могут служить для соединения самых различных устройств (телефон, телевизор, компьютер и др.) и без труда способны обеспечить передачу видео, аудио и данных.

Радиолокация. В этой области широта поля действия для СШП — вообще необычайная: от авиационных радаров коммерческого и военного применения для получения радиоизображений и образов целей, портативных промышленных радаров для мониторинга и контроля процессов, до охранных систем и средств борьбы с терроризмом и преступностью, обеспечивающих получение изображений скрытых объектов и позволяющих решить задачи видения сквозь стены на расстояниях от единиц до сотен метров. Очень неплохо СШП вписываются и в медицинские приложения.

Задачи позиционирования. Возможность измерения расстояний с точностью до сантиметров позволяет широко использовать системы СШП для определения местоположения различных объектов, дистанционного управления транспортными средствами и промышленными работами.

Специальные (государственные и военные) применения.

Выводы

1. Создание и практическое использование сверхширокополосных систем – качественно новый скачок в развитии современных систем связи.

2. Системы с СШПС могут более успешно, чем узкополосные, решать следующие задачи: обнаружение и распознавание объектов (радиолокация); повышение объема и скрытности передачи данных в радиосвязи; увеличение точности местоопределения в навигации.

3. Использование СШПС, ширина спектра которых соизмерима с их средней частотой, позволяет на более высоком информационном уровне решать целый комплекс задач, начиная с принципов приёма и обработки информации и кончая математическими методами синтеза и анализа РЭС.

4. В системах связи на основе СШПС использование с помощью набора из N независимых (ортогональных) псевдослучайных сигналов позволит организовать работу N независимых каналов связи в одной и той же полосе частот без взаимных помех.

5. Применение СШПС позволит устранить недостатки систем радиосвязи, связанные с многолучевым распространением радиоволн. Например, с помощью сети опорных СШП радиостанций пользователи смогут определять своё местоположение в пределах зданий или других участков с мешающими отражениями, где обычные приёмники GPS не будут эффективно работать в условиях многолучевого распространения радиосигналов.

6. Применение сверхширокополосных сигналов в радиосвязи позволит резко повысить её надёжность и защищённость от несанкционированного проникновения, благодаря технологии расширения спектра (spread spectrum).

Литература

1. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. – М.: Радиотехника, 2009. – 288с.
2. Быков С.Ф., Шалимов И.А. Передача речи в современных сетях связи. Специальная Техника, 2000, №6.
3. Лазоренко О.Ф., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. – Радиофизика и радиоастрономия, 2008, т.13, с.166–194.
4. Дмитриев В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB). Компоненты и технологии. 2003, №9.
5. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В.Ю. «Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети». Радио и электроника, 2008, том 53, №10.
6. Шахнович И.В. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001, №4, с.8–14.
7. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384с.
8. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.
9. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности. – Вестник МГТУ, 1998, №4, с.128–133.
10. Иммореев И.Я., Синявин А.Н. Изучение сверхширокополосных сигналов. Сб. Антенны, 2001, №47.
11. Вишнеvский В.И., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2006. – 288с.
12. Иммореев И.Я., Судаков А. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2003. №2.
13. Беспроводная технология Ultra WideBand. КомпьютерПресс, 2005, №5.
14. Асанович Б.А. UWB: на большой скорости по сверхширокой полосе. Технологии и средства связи, 2007, №5.
15. Дмитриев В. Технологии передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов. Компоненты и технологии, 2004, №1.