

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 519.6

### СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ И СЕНСОРНЫЕ СЕТИ

© 2008 г. А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, А. В. Клецов, Л. В. Кузьмин,  
А. М. Лактюшкин, В. Ю. Юркин

Поступила в редакцию 19.05.2008 г.

Рассмотрено интенсивно развивающееся направление в области беспроводной сверхширокополосной связи. Описаны разработанные в ИРЭ РАН сверхширокополосные прямохаотические приемопередатчики двух типов и продемонстрировано их применение в беспроводных сенсорных сетях.

#### ВВЕДЕНИЕ

Радиосвязь, основателями которой были выдающиеся инженеры и ученые М. Фарадей, Дж.К. Максвелл, А.С. Попов, Г. Маркони, Н. Тесла, как средство коммуникаций существует уже более 100 лет. При развитии беспроводной (радио) связи возник вопрос о ее массовом использовании, что обусловило в 20–30 гг. XX века создание радиовещания и построение сетей радиовещательных станций. В 1930–1940 гг. было создано телевидение как новое направление в радиосвязи. Развертывание беспроводных сетей телевидения обеспечило доступ к высококачественной видеоинформации в ранее удаленных от цивилизации уголках земного шара и даже за его пределами.

Развитие радиосвязи стало возможным благодаря совместным усилиям исследователей и разработчиков в различных областях техники и науки. При реализации масштабных проектов массовой радиосвязи, а также при более специальных ее применениях возникли и успешно развивались такие направления в науке, как радиофизика и теория информации. Уже в 20-е гг. XX века некоторым выдающимся ученым и инженерам (эти термины в отношении них практически невозможно разделить), стала ясна необходимость более глубокого изучения физических явлений, связанных с генерацией, модуляцией, излучением, распространением, приемом и обработкой радиосигналов. Также нужно было решить фундаментальные вопросы, связанные с содержанием передаваемых сигналов. Хотя развитие радиосвязи начиналось с систем дискретной передачи информации, радиовещание и телевидение – наиболее массовые системы, использующие радиотехнологии, которые в течение многих лет являются аналоговыми системами. Научный прорыв, совершенный в 1930–1940-е гг. В.А. Котельниковым [1], и результаты, полученные К. Шенноном [2], составили основу теории информации. Эти работы были поддержаны и математически обоснованы в трудах А.Н. Колмогорова, А.Я. Хинчина,

Р.Л. Стратоновича, А.М. Яглома и других советских ученых, что привело к формированию теории информации как научной дисциплины (см. [3] и приведенную там библиографию).

Успешное развитие радиофизики, электроники (элементной базы) и теории информации в 1950–1960-х гг. позволило решить ряд чрезвычайно сложных задач космической связи и радиолокации планет. С точки зрения массовых коммуникаций выдающимся событием стало в этот период появление и развитие спутниковой связи. Для этой цели начали использовать спутники на высокоэллиптических и стационарных орбитах. Выяснилось, что необходимо передавать через спутники-ретрансляторы разнообразную информацию: от телефонных разговоров до телепередач и цифровых потоков обмена информацией между компьютерами. Серьезность проблемы привела к комплексным решениям, позволяющим “увязывать” передачу разнородной информации в рамках одной радиосистемы. Это – методы разделения сигналов по пространству, частоте, по времени, а также кодовое разделение сигналов. Также появилась и постепенно стала доминировать идея полного перехода к цифровым методам передачи.

Применение цифровых методов передачи информации в решающей степени связано с развитием вычислительной техники. Действительно, осуществление функций разделения сигналов, пакетирования информации, ее адресация и обработка после приема требуют значительных вычислительных ресурсов. Применение цифровых методов в персональных коммуникационных системах стало возможным на рубеже 80–90-х гг. XX века с появлением достаточно эффективных сигнальных процессоров и микроконтроллеров.

К этому времени уже появились первые беспроводные сотовые телефонные сети. Сочетание сотовых технологий с цифровыми методами обработки сигналов позволило широко использовать временное и кодовое разделение сигналов, что привело к фантастическому синергетическо-

му результату – сверхмассовому распространению сотовой связи. Возможность реализации мобильной персональной связи для миллиардов людей 20–30 лет назад обсуждалась только писателями-фантастами.

Такая ситуация сложилась с беспроводными коммуникациями в начале XXI века. Кажется, что самые необычные и интригующие возможности уже реализованы, но воображение и потребности не ограничены.

В данной работе на примере одного потенциально очень важного направления радиосвязи – сверхширокополосного радио – рассмотрен создаваемый в последние годы новый научно-технический потенциал систем и средств беспроводной связи, который должен ответить на вызовы нового века.

## 1. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ И НОВЫЕ ТИПЫ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

Гармонические колебания в течение длительного времени были основным типом носителя при передаче информации. Однако в последние годы эта ситуация начинает меняться, что связано с развитием сверхширокополосной связи.

К сверхширокополосным (СШП) сигналам относят сигналы с центральной частотой  $F_{ц}$  и полосой  $\Delta F$ , имеющие относительную полосу  $D = \frac{\Delta F}{F_{ц}} > 0.2 \dots 0.25$ . В решении Федеральной комиссии США по связи (ФКС) 2002 г. [4], заложившей основу для нелицензируемого использования СШП в средствах беспроводной связи, к сверхширокополосным сигналам относят также сигналы с полосой  $\Delta F > 500$  МГц (в диапазоне частот 3.1...10.6 ГГц).

Первоначально в качестве основного типа СШП-сигналов рассматривались сверхкороткие импульсы, при использовании которых разработка технологии связи стимулировала развитие СШП-технологий в целом. Затем появились и другие СШП-технологии, часть из которых к настоящему времени уже вошла в стандарты связи.

Приведем перечень СШП беспроводных технологий, который в настоящее время следующий.

1. *Ультракороткие импульсы* [5, 6]. Длительность импульсов зависит от используемого диапазона частот, но обычно составляет от 100 до 2000 пс. Свойством этих сигналов являются жесткая связь длительности импульса с шириной спектра мощности и его расположение на частотной оси: спектр мощности простирается от нуля до частоты  $f \approx 1/T$ , где  $T$  – длина ультракороткого импульса (рис. 1а). База сигнала  $B \approx 1$ .

2. *Короткие радиоимпульсы – цуги колебаний* [7]. В рамках данного подхода сигнал формирует-

ся в заданной полосе частот. Как и в случае ультракоротких импульсов, имеет место жесткая связь между длиной импульса и спектром мощности сигнала. Для получения более равномерной спектральной плотности в полосе частот форму огибающей импульса выбирают колоколообразной (рис. 1б). База сигнала  $B \approx 1$ .

3. *Хаотические радиоимпульсы* [8, 9]. Огибающая спектра мощности у этих сигналов определяется исходным спектром непрерывного хаотического сигнала и при выполнении определенных условий практически не зависит от длины импульсов (рис. 1в). База сигнала может меняться в широких пределах.

4. *Пачки коротких импульсов* [10]. Как и в случае единичного короткого импульса, форма одинаковых импульсов согласуется с заданной полосой частот (рис. 1г). База сигнала пропорциональна числу импульсов в пачке.

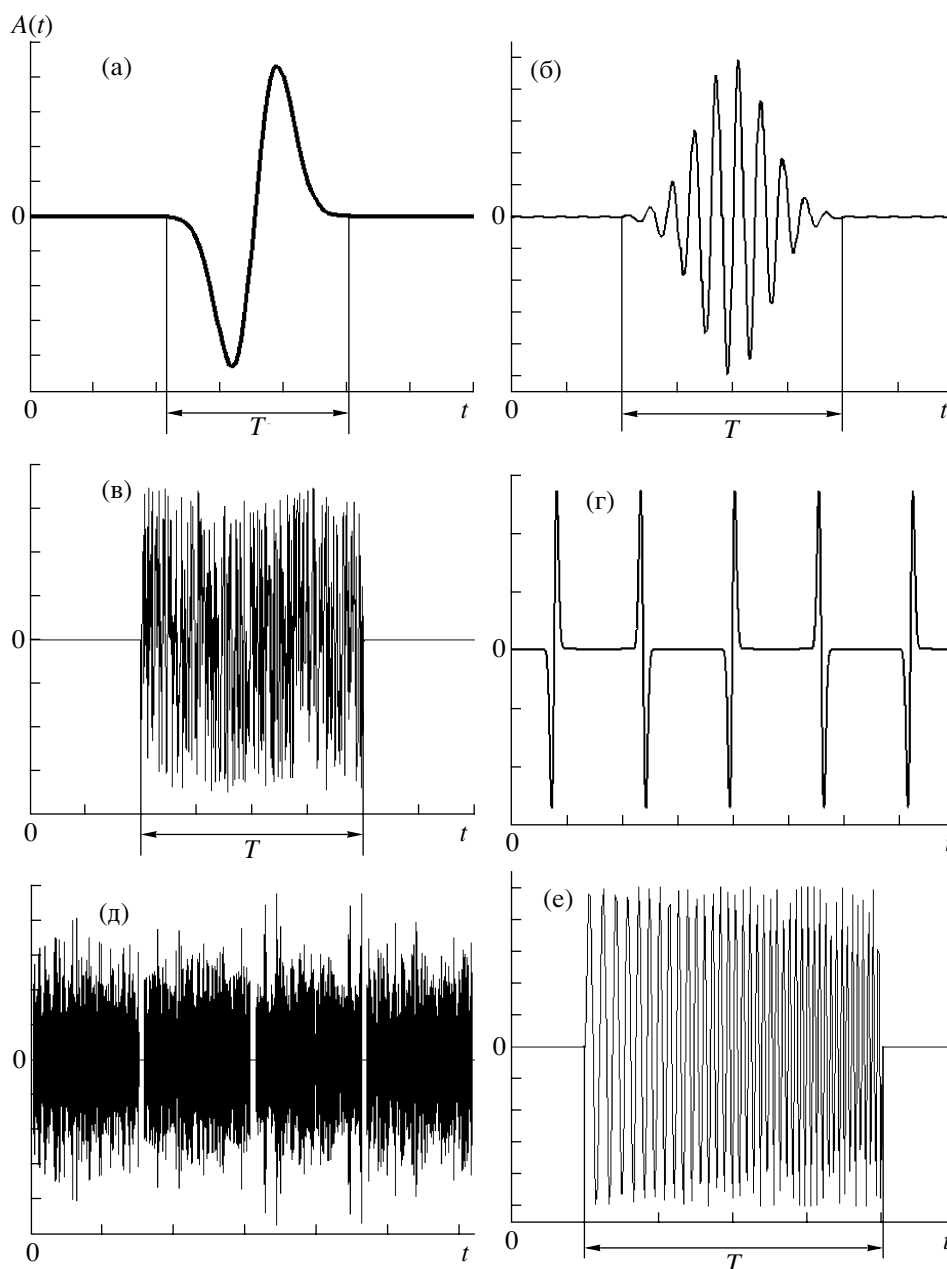
5. *Сигналы с прямым расширением спектра*. Это решение предполагает “нарезку” синусоидального сигнала на очень короткие фрагменты – “чипы” [11]. Для передачи одного бита используется серия “чипов”. В пределе при использовании одного “чипа” для передачи одного бита данный метод совпадает с методом формирования ультракоротких импульсов. База сигнала равна числу “чипов”, используемых для передачи одного бита информации.

6. *Сигналы с ортогонально-частотным мультиплексированием (OFDM)* [12]. Этот тип сигналов давно и успешно применяется в радиосвязи (рис. 1д). Особенностью его использования в СШП-системах является большая ширина спектра ( $\approx 500$  МГц) по сравнению с OFDM-сигналами, применяемыми ранее.

7. *Сверхширокополосные сигналы на основе частотной модуляции (FM UWB)* [13, 14]. Эти сигналы формируются за счет сканирования частоты в генераторах, управляемых напряжением (рис. 1е). При однократном проходе частоты в пределах импульса база сигнала пропорциональна длине импульса. Скорость перестройки определяет минимальную длину импульса, на которой происходит полная перестройка частоты. В этом случае база сигнала равна  $B = \Delta T \Delta F$ , где  $\Delta T$  – длина импульса;  $\Delta F$  – полоса частот перестройки.

Этот перечень можно продолжить.

Следует отметить, что основная идея массового применения СШП-связи была тесно связана с импульсной СШП-технологией и заключалась в том, чтобы создать очень простые и дешевые беспроводные средства связи. Действительно, в схемах связи с ультракороткими импульсами все выглядит очень просто: “1” – передается импульсами, “0” – импульс на заданной временной позиции отсутствует. Любое усложнение этой схемы приводит к увеличению стоимости приемопередатчи-



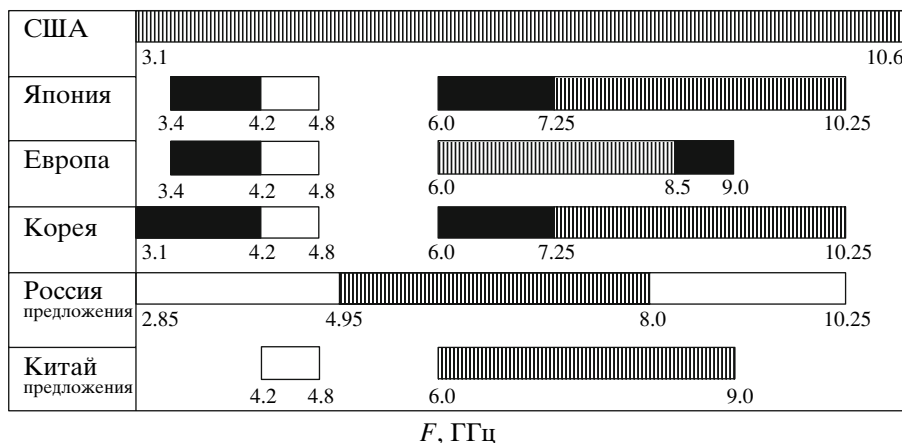
**Рис. 1.** Фрагменты СШП-сигналов (зависимость амплитуды  $A$  от времени  $t$ ): а – ультракороткий импульс длительностью  $T$ ; б – короткий импульс, сформированный из фрагмента гармонического сигнала длительностью  $T$  с гауссовской огибающей; в – хаотический радиоимпульс длительностью  $T$ ; г – пачка из ультракоротких импульсов; д – сигнал с ортогонально-частотным мультиплексированием; е – линейно-частотно модулированный импульс длительностью  $T$ .

ков. Но даже в такой на первый взгляд простой схеме передачи информации есть проблемы, требующие решения. Одной из проблем, в частности, является синхронизация передатчика и приемника. Например, для того чтобы эффективно осуществить когерентный прием, необходимо обеспечить синхронизацию с точностью не хуже 10 пс при длине импульса, равной 150 пс. Это непростая задача, и для ее решения применяются техноло-

гии со значительным потреблением энергии и достаточно сложной схмотехникой.

## 2. НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Начиная с 2002 г., когда было принято упоминавшееся выше решение ФКС США, в ряде стран проводились аналогичные работы по выделению диапазонов частот для нелицензируемой СШП-связи. С учетом местных условий каждая из стран



**Рис. 2.** Частотный план для СШП-устройств (принятый или рассматриваемый) в различных странах мира: штриховка – диапазон открыт для свободного использования; черный цвет – вопрос об использовании диапазона обсуждается; белый цвет – обсуждаются ограничения на излучение СШП-устройств.

(или группы стран, например ЕС) формировала свою маску допустимой спектральной плотности электромагнитных сигналов в диапазоне частот 3.1...10.6 ГГц. В некоторых странах работа уже закончена, и решения по спектральной маске приняты (Сингапур, Япония, Корея, ЕС), в других решения предполагают принять в 2008 г. (Россия, Китай). В целом картина выделения частот для нелицензируемой СШП-связи по странам представлена на рис. 2.

В соответствии с имеющимися тенденциями и ограничениями на спектральную плотность СШП-сигналы в первую очередь будут использоваться в персональных и сенсорных сетях локального типа. При этом дальность действия отдельного устройства будет составлять от единиц до десятков метров.

Важной характеристикой СШП-устройств является пропускная способность канала связи. Потенциально высокая скорость передачи отдельного устройства либо агрегированная скорость передачи совокупности устройств, находящихся на одном участке, является естественным преимуществом СШП-систем перед узкополосными системами. По этому показателю СШП-системы связи можно разделить на три категории: высокоскоростные (от 50 до 500 Мбит/с), среднескоростные (от 1 до 50 Мбит/с) и низкоскоростные (до 1 Мбит/с).

Для высокоскоростных и низкоскоростных систем в 2002 и 2004 гг. соответственно была начата разработка первых стандартов.

В 2002 г. рабочая группа 802.15 американского Института инженеров по электротехнике и электронике, осуществляющая стандартизацию систем беспроводных коммуникаций для персональных компьютерных сетей, объявила конкурс на предложения по стандарту нового (альтерна-

тивного) физического уровня для беспроводных персональных сетей (WPAN – Wireless Personal Area Networks) и беспроводных локальных сетей (WLAN – Wireless Local Area Networks) на основе технологии СШП с высокой пропускной способностью, обеспечиваемой на сравнительно небольших расстояниях (порядка 5...10 м).

В качестве основных критериев при отборе предложений для формирования стандарта рассматривались следующие:

- 1) скорость передачи для отдельного соединения до 500 Мбит/с, высокая пропускная способность (до 1.5 Гбит/с на узле), большое число конечных устройств;
- 2) средняя эффективная изотропно-излучаемая мощность согласно маске ФКС США;
- 3) безопасность передачи данных;
- 4) электромагнитная совместимость ячейки сети (пикосети) по крайней мере с тремя другими ячейками;
- 5) низкий уровень задержек для обеспечения передачи мультимедийной информации в реальном времени, удовлетворение требованиям качества связи (QoS – Quality of Service);
- 6) электромагнитная совместимость с системами WPAN, WLAN и другими системами электро-связи;
- 7) устойчивость в условиях многолучевого распространения (в помещении).

Кроме того, специальная группа разрабатывала модели каналов для различных физических реализаций СШП-сетей и возможные конкретные приложения. В процесс разработки стандарта включились практически все ведущие мировые коммуникационные компании. Фактически участвующие в процессе создания стандарта компании

разделились на два лагеря, отстаивающих свои принципы формирования физического уровня стандарта.

Работы над созданием новой технологии связи проводили в двух параллельных направлениях:

1) первое объединение (получившее название MBOA-UWB – Multi-Band OFDM Alliance – UWB) предлагало разбить выделенный частотный диапазон на поддиапазоны шириной по 528 МГц и использовать OFDM-модуляцию. Предлагаемый подход позволял обеспечить дальность связи до 10 м, в том числе пропускную способность на уровне 480 Мбит/с при дальности связи до 3 м и 110 Мбит/с при дальности связи до 10 м;

2) подход второго объединения (получившего название DS-UWB – Forum – Direct Sequence Ultra Wide Band Forum) был основан на импульсном решении (форма импульсов согласована с полосой частот) и подразумевал использование двух диапазонов частот: нижнего основного (3.1...4.9 ГГц) и верхнего необязательного для использования (6.2...9.7 ГГц). Каждый из диапазонов имел относительную полосу  $\approx 50\%$ . Символ формируется последовательностью от 1 до 24 импульсов. Частота следования импульсов 1320 МГц. Предлагаемый подход позволял обеспечить скорость передачи 660 Мбит/с на дальности до 3 м и скорость передачи 110 Мбит/с на дальности до 18 м.

В результате трехлетних обсуждений ни один из предложенных рабочей группой IEEE вариантов так и не был стандартизирован (в ходе голосования ни один из вариантов не получил большинства голосов), и после трех лет работы группа самораспустилась. Юридический статус технологии не был зафиксирован. Это, впрочем, не мешало распространению СШП-технологий, и технология MBOA-UWB, к тому моменту уже составившая основу технологии Wireless USB, а затем и Certified WUSB, начала распространяться по планете, в то время как технология DS-UWB была внедрена лишь в некоторых приложениях автомобильной электроники.

В 2004 г. рабочая группа 802.15 американского Института инженеров по электротехнике и электронике объявила конкурс на предложения по стандарту нового (альтернативного) физического уровня для беспроводных персональных сетей на основе технологии СШП с небольшой пропускной способностью каждого отдельного устройства, обеспечиваемой на расстояниях до 30 м.

В качестве основных критериев при отборе новых предложений для формирования стандарта рассматривались следующие:

1) скорость передачи для отдельного соединения до 1 Мбит/с, агрегированная пропускная спо-

собность в сети до 10 Мбит/с, число конечных устройств в сети – до 10 тысяч;

2) средняя эффективная изотропно-излучаемая мощность согласно маске ФКС США;

3) безопасность передачи данных;

4) электромагнитная совместимость ячейки сети (пикосети) по крайней мере с тремя другими ячейками;

5) электромагнитная совместимость с системами WPAN, WLAN и другими системами электро-связи;

6) устойчивость в условиях многолучевого распространения (в помещении).

В январе 2005 г. компании и организации внесли более 25 предложений по формированию стандарта. В их числе было совместное предложение от ИРЭ РАН и Института передовых исследований компании Самсунг (SAIT – Samsung Advanced Institute of Technology) использовать в этом стандарте в качестве носителей информации хаотические радиоимпульсы.

Летом 2007 г. стандарт был принят [15]. В качестве основного СШП-решения в нем используются последовательности импульсов, сопряженные с полосами частот порядка 500 МГц. В качестве опциональных решений используются хаотические импульсы и импульсы с линейной частотной модуляцией (“chirps”).

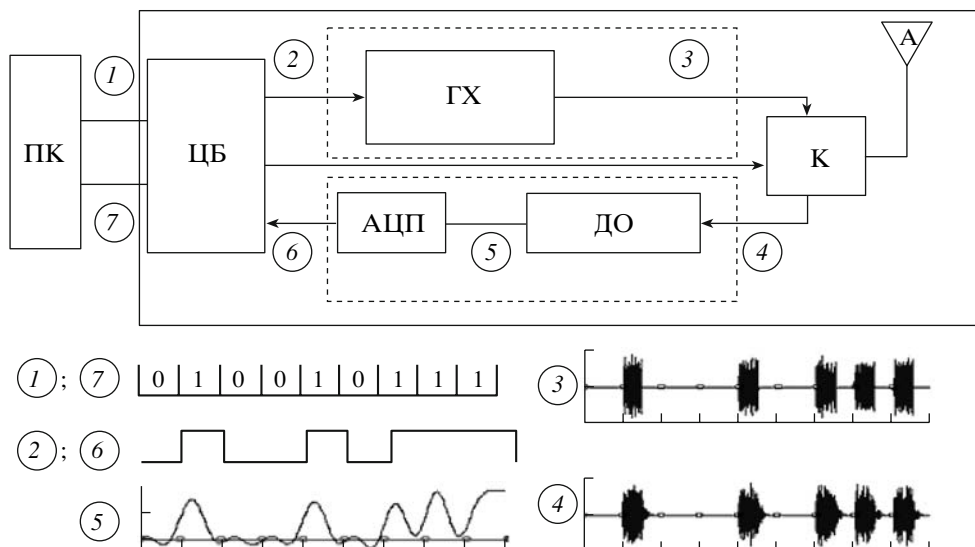
СШП беспроводная связь со средними скоростями (от 10 до 50 Мбит) пока не вошла ни в какие разрабатываемые стандарты, хотя у нее также имеются большие перспективы, связанные, в частности, с применением в персональных малогабаритных мобильных приборах – “гаджетах” (беспроводные аудиоплееры, беспроводные видеочки и т.д.). Специфика применения беспроводной связи в таких устройствах, наряду с достаточно высокими скоростями передачи, требует высокой мобильности и малой потребляемой мощности.

### 3. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПРЯМОХАОТИЧЕСКИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКИ

Теоретический анализ, подтвержденный результатами конкретных разработок, показывает, что прямохаотические системы связи имеют хорошие характеристики прежде всего для низкоскоростных и среднескоростных систем СШП-связи.

Ниже рассмотрим два типа устройств этого класса, созданных в ИРЭ РАН.

Принцип действия прямохаотических приемопередатчиков, их структура и характеристики описаны в работах [8, 9, 16–20]. К настоящему



**Рис. 3.** Структура прямохаотического приемопередатчика (ПП) и фрагменты сигнала в различных точках системы: 1, 7 – на входе и выходе цифровой платы ПП, соединенной с персональным компьютером (ПК); 2, 6 – на выходе и входе цифрового блока (ЦБ), управляющего генератором хаоса (ГХ), ключом (К) и принимающего сигнал от аналого-цифрового преобразователя (АЦП); 3 – сигнал, излучаемый в эфир (поток хаотических радиоимпульсов) через антенну (А); 4 – поток хаотических радиоимпульсов, принимаемый из эфира; 5 – огибающая потока хаотических радиоимпульсов на выходе детектора огибающей (ДО).

времени разработано несколько типов СШП прямохаотических приемопередатчиков, два из которых описываются ниже.

*СШП-приемопередатчик ППС-40* предназначен для использования в качестве средства связи между сенсорами, а также между сенсорами и компьютером. Устройство обладает последовательным интерфейсом UART, позволяющим подключать различные внешние устройства: сенсоры, аудио- или видеисточники сигнала и организовывать экспериментальные сенсорные сети.

Физический уровень устройства, в котором используются хаотические импульсы для передачи информации в эфир, удовлетворяет стандарту IEEE 802.15.4a.

Устройство характеризуется параметрами, перечисленными в табл. 1.

Структура приемопередатчика показана на рис. 3. СВЧ-часть передатчика реализована в виде транзисторного генератора хаоса. Для формирования хаотических радиоимпульсов используется внутренняя модуляция сигнала генератора, которая осуществляется на основе идеи, предложенной и исследованной в работах [21–25].

Специально для приемопередатчика разработана высокоэффективная всенаправленная микрополосковая антенна, выполненная на единой с устройством плате. Кроме высоких электродинамических характеристик, достоинством антенны является высокая технологичность: антенну “изготавливают” в процессе травления платы; антенна не требует настройки.

Приемник огибающей создан на основе логарифмического детектора, предназначенного для работы в полосе от 1 МГц до 10 ГГц. Оригинальность приемника заключается в том, что в нем отсутствует отдельная система автоматической регулировки усиления принимаемого сигнала. Регулирование усиления входного сигнала осуществляет логарифмический детектор, имеющий динамический диапазон 50 дБ (от –50 до 0 дБм).

Минимальная длительность импульса, который приемник способен детектировать, составляет 20 нс.

Внешний вид приемопередатчика ППС-40 приведен на рис. 4.

**Таблица 1.** Технические характеристики СШП прямохаотического приемопередатчика ППС-40

Полоса выходного сигнала	3.1...5.1 ГГц
Средняя мощность сигнала, излучаемого в эфир, скорость 2.5 Мбит/с	–16 дБм
Средняя мощность сигнала, излучаемого в эфир, скорость 0.1 Мбит/с	–27 дБм
Дальность	5...7 м
Максимальная физическая скорость передачи/приема данных	2.5/2.5 Мбит/с
Интерфейс	UART
Напряжение питания	4.5 В

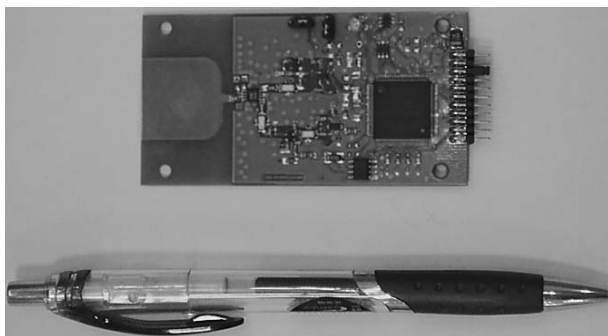


Рис. 4. Внешний вид СШП прямохаотического приемопередатчика ППС-40.

*СШП-приемопередатчик ППС-50* предназначен для использования в беспроводных сенсорных сетях. Пара таких приемопередатчиков, один из которых связан с сенсором по UART интерфейсу, а другой используется в качестве либо терминального устройства, либо ретранслятора, образует радиомост. Устройство может работать на больших расстояниях, чем приемопередатчик ППС-40. Это достигается за счет применения передатчика с повышенной мощностью излучения и приемника с большей чувствительностью и слабонаправленной микрополосковой антенны с двумя полудиполями (рис. 5).

Кроме того, при работе сенсорной сети требуется длительное функционирование СШП-приемопередатчика без замены источников питания. Поэтому при разработке приемопередатчика ППС-50 большое внимание было уделено энергосбережению, в частности спящим режимам.

Для обеспечения максимального энергосбережения разработанный приемопередатчик в зависимости от стадии решаемой задачи может функционировать в следующих режимах:

- 1) в глубоком спящем режиме;
- 2) в спящем режиме;
- 3) в режиме приема информации от внешнего источника данных и излучения сигнала в окружающее пространство;
- 4) в режиме приема сигнала из окружающего пространства и передачи информации на внешнее устройство, принимающее данные.

В глубоком спящем режиме приемопередатчик периодически прослушивает эфир на предмет поступления команды для перехода в другой режим работы. Периодичность прослушивания составляет один раз в 100 с, что обеспечивает работу приемопередатчика от комплекта из четырех батарей типа АА до трех лет.

В спящем режиме периодичность прослушивания составляет один раз в 1 с, что дает возможность оперативно управлять режимом работы

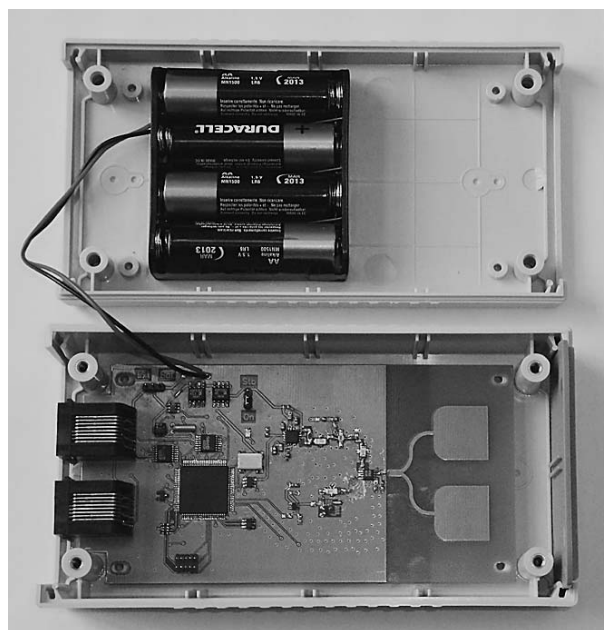


Рис. 5. Внешний вид СШП прямохаотического приемопередатчика ППС-50.

приемопередатчика во время активного использования.

В режиме приема информации от внешнего источника данных приемопередатчик в потоковом режиме преобразует полученную информацию в последовательность хаотических радиоимпульсов и транслирует их в окружающее пространство. При этом приемопередатчик периодически прослушивает эфир на предмет поступления команды для перехода в другой режим работы.

В режиме приема сигнала из окружающего пространства приемопередатчик непрерывно прослушивает эфир в ожидании поступления данных или управляющих команд. Принятые данные при необходимости в потоковом режиме передаются внешнему приемнику данных.

Приемопередатчик имеет технические характеристики, приведенные в табл. 2.

#### 4. СЕНСОРНЫЕ СЕТИ

Рассмотрим два примера построения сенсорных сетей на основе описанных выше СШП-приемопередатчиков.

*Лабораторная сенсорная сеть.* Беспроводная СШП сенсорная сеть (система сбора информации) состоит из 10 прямохаотических приемопередатчиков и пульта управления, реализованного на компьютере с соответствующим программным обеспечением. Пульт управления контролирует состояние приемника хаотических радиоимпульсов, отображает его текущее состояние, принимает и обрабатывает данные от сети передатчиков,

П	К	Р	АН	АО	НК	НП	Д	КС
---	---	---	----	----	----	----	---	----

**Рис. 6.** Структура информационного пакета, используемого в ППС-40 и ППС-50: П – пилотный байт синхронизации; К – поле, определяющее тип системы, которая передает пакет; Р – размер пакета в байтах; АН – адрес устройства-получателя пакета; АО – адрес устройства-отправителя пакета; НК – номер команды; НП – номер передаваемого пакета для контроля целостности; Д – передаваемые данные; КС – контрольная сумма пакета.

автоматически определяет присутствие в эфире каждого передатчика, сохраняет или производит дополнительную обработку информации от передатчиков.

Из указанных 10 устройств шесть снабжены различными сенсорами, осуществляющими сбор информации (датчики температуры, освещенности, алкоголя), три приемопередатчика используются только в режиме ретрансляторов, и одно терминальное устройство подсоединено к последовательному порту компьютера.

Дальность действия приемопередатчиков в свободном пространстве составляет 12...15 м. В передатчиках применяется асинхронный пакетный принцип передачи данных. Структура пакета представлена на рис. 6 и состоит из следующих полей: пилотного байта синхронизации; поля, определяющего тип системы, которая передает пакет длительностью один байт; поля, определяющего размер пакета в байтах, длительностью один байт; поля адреса устройства-получателя пакета длительностью один байт; поля адреса устройства-отправителя пакета длительностью один байт; поля номера команды длительностью один байт; поля номера передаваемого пакета для контроля целостности длительностью один байт; поля, содержащего передаваемые данные длительностью  $N$  байт; поля контрольной суммы пакета длительностью два байта. Общая длина пакета составляет  $9 + N$  байт. Физическая скорость передачи равна 2.5 Мбит/с. Она используется внутри пакета. Между пакетами имеются интервалы времени, которые определяют фактическую скорость передачи данных. В рассматриваемом приложении последняя составляет около 100 Кбит/с.

Установку и настройку сети производят в следующем порядке.

Сначала устанавливаются приемопередатчики с сенсорами. Перед установкой в их микроконтроллеры вносятся соответствующие адреса. Связь между приемопередатчиком пульта управления и каждым из приемопередатчиков с сенсорами можно осуществлять либо напрямую, либо через ретранслятор. Соответствующие маршруты вносятся в память микроконтроллера ретранслятора.

В пункт управления информация с сенсоров поступает через интервалы времени  $\approx 1$  с. Каждый сенсор передает информацию на пульт управления независимо, не согласуя интервалы времени передачи с другими устройствами. Поскольку цикл пе-

редачи составляет менее 1 мс, вероятность “столкновения” пакетов мала и ею пренебрегают.

*Беспроводная сверхширокополосная система сбора данных.* Цель разработки – создание средств СШП беспроводной связи для системы мониторинга технического состояния крытого конькобежного центра в Крылатском (Москва).

Ледовая арена конькобежного центра показана на рис. 7. Беспроводная система мониторинга должна определять состояние конструкций сооружения, в том числе полукольцевой железобетонной балки и несущих ферм, поддерживающих крышу.

Сверхширокополосная беспроводная система связи содержит 57 приемопередатчиков, расположенных на фермах сооружения вместе со станциями мониторинга; 10 приемопередатчиков, расположенных на полукольцевой балке (рис. 8).

Приемопередатчики на фермах используются для получения команд со стороны центрального пункта управления на включение/выключение активного режима самих приемопередатчиков, для включения станций мониторинга, получения от них данных, передачи этих данных на центральный пункт управления и выключения станций мониторинга.

Приемопередатчики на полукольцевой балке используются как ретрансляторы при передаче

**Таблица 2.** Технические характеристики СШП прямо-хаотического приемопередатчика ППС-50

Диапазон частот излучаемого сигнала от 3.1 до 5.1 ГГц по уровню $-10$ дБ от максимума спектральной плотности	3.1...5.1 ГГц
Выходная мощность в непрерывном режиме	4.7 дБм
Средняя излучаемая мощность, 2.5 Мбит/с	$-8.3$ дБм
Средняя излучаемая мощность, 0.1 Мбит/с	$-22.3$ дБм
Дальность	40...60 м
Максимальная физическая скорость передачи/приема данных	2.5/2.5 Мбит/с
Интерфейс	UART
Напряжение питания	6 В





Рис. 7. Ледовая арена конькобежного центра в Крылатском.

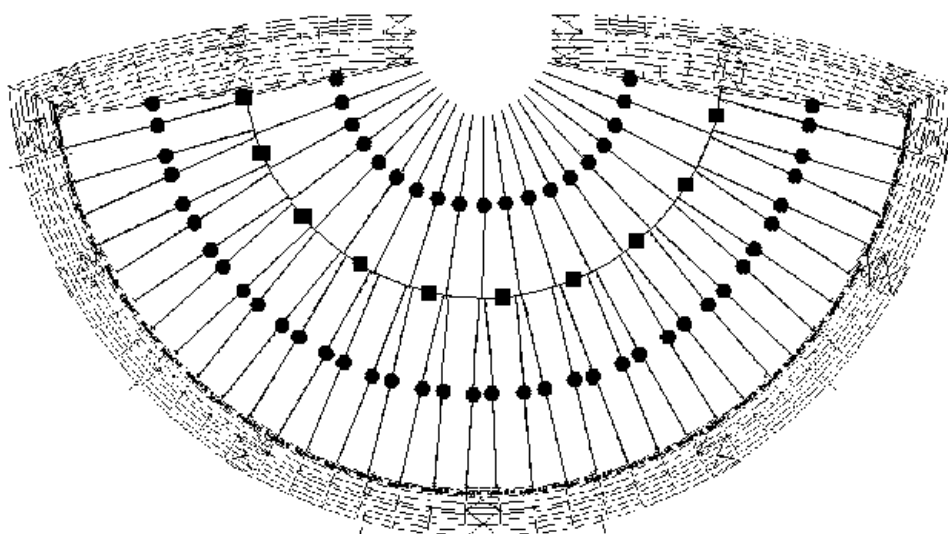
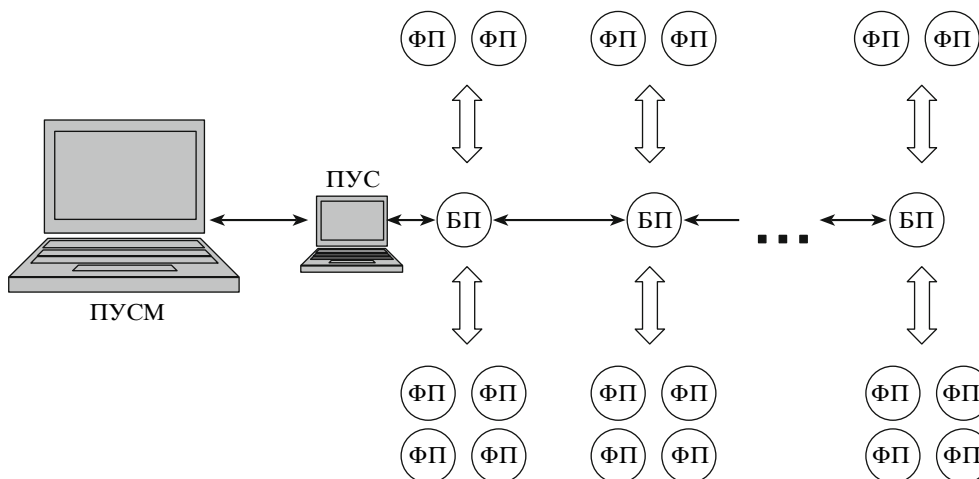


Рис. 8. План конькобежного центра со схемой расположения СШП прямохаотических приемопередатчиков: кружочками отмечены места расположения фермовых приемопередатчиков, подключенных к станциям мониторинга (сейсмографам), квадратиками отмечены места размещения приемопередатчиков, установленных на полукольцевой балке и соединенных проводом с пультом управления сетью.

команд от центрального пункта управления к станциям мониторинга, расположенным на фермах, и при передаче потоков данных от станций мониторинга к центральному пункту управления. Приемопередатчики на балке соединены кабелем с компьютером управления беспроводной сетью,

который в свою очередь связан с компьютером управления системой мониторинга в целом (рис. 9).

Каждый из приемопередатчиков на балке является ретранслятором для определенной группы приемопередатчиков на фермах. Все приемопередатчики системы имеют встроенные источники



**Рис. 9.** Функциональная схема беспроводной сети сбора данных, установленной в конькобежном центре: ФП – фермовые приемопередатчики, БП – базовые приемопередатчики, соединенные кабелем с пультом управления сетью (ПУС) и далее с пультом управления системой мониторинга (ПУСМ).

питания, обеспечивающие длительную автономную работу устройств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхширокополосные системы связи в первую очередь рассматриваются как системы связи на малых расстояниях. При этом если мощность излучения сотовых телефонов составляет 100...300 мВт, систем типа Wi-Fi – 100 мВт, а систем типа Bluetooth – 1...10 мВт, то мощность излучения СШП-устройств связи < 100 мкВт. Это означает, что для передачи одного бита информации сотовый телефон излучает  $10^{-7} \dots 3 \times 10^{-7}$  Дж, передатчик Wi-Fi –  $10^{-8}$  Дж, передатчик Bluetooth –  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  Дж, а СШП-передатчик –  $10^{-12} \dots 10^{-10}$  Дж. Таким образом, энергия, излучаемая СШП-системой на передаваемый бит, меньше 1 нДж, в то время как в других современных системах связи она больше.

Радиотехнологии с использованием таких сверхнизких уровней излучаемой энергии на бит передаваемой информации уместно называть субнано радиотехнологиями или нанорадиотехнологиями. Для разработки нанорадиотехнологий необходимо решить ряд новых радиофизических проблем, связанных с генерацией сигналов очень малой мощности, их излучением при помощи компактных антенн, распространением этих сигналов в специфических средах на малые расстояния и эффективным приемом с малыми энергетическими затратами.

Другая группа проблем, связанных с СШП-средствами беспроводной связи и сенсорными системами, относится к электромагнитной совместимости.

При широком использовании беспроводной связи возникает проблема взаимных помех, создаваемых радиосредствами. Чтобы позволить всем сотовым телефонам, компьютерам, подключенным к беспроводному Интернету, радиостанциям работать успешно и не мешать друг другу, следует использовать весь радиодиапазон, и кроме того, “обучить” электронные устройства анализировать ситуацию и выбирать наиболее подходящий способ и протокол связи. Для таких интеллектуальных радиосистем, характеризующихся способностью извлекать из радиосигналов и анализировать информацию об окружающем радиопространстве, предсказывать изменения канала связи и адаптировать свои внутренние параметры состояния к изменениям радиосреды, Д. Митоллой был предложен термин “когнитивное радио” [26].

Одна из основных целей, стоящих перед разработчиками когнитивного радио, заключается в наиболее эффективном использовании имеющихся радиоресурсов. СШП-системы связи позволяют достичь этой цели при выборе одного из ряда частотных диапазонов на условиях предварительного анализа радиообстановки в них (рис. 2).

Рассмотрим роль беспроводных сенсорных сетей, которую они смогут сыграть в недалеком будущем.

Что представляет собой компьютер с точки зрения натуральной философии? Это устройство, которое перерабатывает вводимую в него информацию и выдает результат. Снабженное общим и специализированным программным обеспечением, продвинутыми средствами ввода информации, интерфейсами взаимодействия с человеком компьютер обеспечивает взаимодействие “внешней

среды” в виде человека с собой. Имеются варианты распараллеливания принимаемой и обрабатываемой информации. В специальных случаях в качестве “внешней среды”, с которой происходит взаимодействие, могут выступать различного рода датчики, исполнительные устройства и т.д. Так происходит, например, когда компьютер используется в качестве средства управления роботом.

При такой трактовке компьютера сенсорная сеть представляет собой совокупность компьютеров (микроконтроллеров), каждый связан с внешней средой датчиком (и возможно исполнительным устройством), от которого поступает информация. Каждое вычислительное устройство производит первичную обработку поступающей информации и передает ее по коммуникационной сети в центральный пункт, где поступающая от всех сенсоров информация анализируется и обрабатывается в совокупности.

Таким образом, сенсорная сеть (особенно в беспроводном варианте) представляет собой распределенную систему взаимодействия интеллектуальной системы с внешней средой. Это качественно новый тип системы по отношению к обычным компьютерам, что является основой для перспективного технологического направления, оказывающего революционное воздействие на все сферы жизни подобно тому, как в предыдущие десятилетия это делала компьютерная техника. Воздействие осуществляется через массовое внедрение беспроводных сенсорных технологий с малым радиусом действия в быту и на производстве. Для развития сенсорных технологий, так же как для развития компьютерной техники, решающее значение наряду с “железом” имеет программное обеспечение в традиционном варианте, или в тех вариантах, которые придут ему на смену: адаптивное, дистанционное, самопрограммирующееся и т.д.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке аналитической целевой программы “Развитие потенциала высшей школы” на 2006–2008 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
3. Биховский М. Пионеры информационного века. История развития теории связи. М.: Техносфера, 2006.
4. Revision of part 15th Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, First Report and Order. ET Docket 98–153, FCC 02-48; April 22, 2002. Wash.: Federal Communications Commission (FCC), 2002. [http://hraunfoss.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf).
5. Win M.Z., Scholtz R.A. // IEEE Commun. Lett. 1998. V. 2. № 2. P. 36.
6. Kelly J. Time Domain’s Proposal for UWB Multi-band Alternate PHY Layer for 802.15.3a. N.Y.: IEEE, 2003. [http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2003/Mar03/03143r2P802-15\\_TG3a-TimeDomain-CFP-Presentation.ppt](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2003/Mar03/03143r2P802-15_TG3a-TimeDomain-CFP-Presentation.ppt)
7. A Tutorial on Ultra Wideband Technology. IEEE 802.15 Working Group, submission, Mar. 2000. N.Y.: IEEE, 2000. [http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2000/Mar00/00082r1P802-15\\_WG-UWB-Tutorial-1-Xtreme-Spectrum.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2000/Mar00/00082r1P802-15_WG-UWB-Tutorial-1-Xtreme-Spectrum.pdf)
8. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9.
9. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 2. С. 224.
10. TG4a Proposal for Low Rate DS-UWB (DS-UWB-LR). N.Y.: IEEE, 2005. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2005/15-05-0021-00-004a-low-rate-ds-uwb-tg4a.ppt>
11. McCorkle J. DS-CDMA: The Technology of Choice For UWB. N.Y.: IEEE, 2003. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2003/Jul03/03277r0P802-15-TG3a-OFDM-vs-CDMA.pdf>
12. Multi-band OFDM Physical Layer Proposal. IEEE 802.15.3a Working Group submission, Jul. 2003. N.Y.: IEEE, 2003. [http://www.ieee802.org/15/pub/2003/Jul03/03268r2P802-15\\_TG3a-Multi-band-CFP-Documents.pdf](http://www.ieee802.org/15/pub/2003/Jul03/03268r2P802-15_TG3a-Multi-band-CFP-Documents.pdf)
13. Lampe J. Introduction to Chirp Spread Spectrum (CSS) Technology. July, 2004. N.Y.: IEEE, 2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2004/15-04-0353-00-004a-chirp-spread-spectrum-technology.ppt>
14. Gerrits J., Kouwenhoven M.H.L., Van der Meer P.R. et al. // European Association for Signal Processing (EURASIP) J. Advances in Signal Processing. 2005. № 3. P. 382.
15. 802.15.4a-2007. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between systems – Local and metropolitan area networks – specific requirement. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). N.Y.: IEEE, 2007. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4299494>.
16. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И. и др. // РЭ. 2002. Т. 47. № 10. С. 1219.
17. Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I. et al. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. V. 13. № 6. P. 1495.
18. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. и др. // РЭ. 2006. Т. 51. № 10. С. 1193.

19. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 4.*
20. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 77.*
21. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 22. С. 29.*
22. *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 1. С. 23.*
23. *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 15. С. 1.*
24. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Григорьев Е.В. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1232.*
25. *Dmitriev A., Efremova E., Kuzmin L., Atanov N. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2007. V. 17. № 10. P. 1.*
26. *Mitola J. III. // Cognitive Radio. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Doctor of Technology Dissertation. Kista: Royal Institute of Technology, 2000. 313 p. [http://www.it.kth.se/~maguire/jmitola/Mitola\\_Dissertation8\\_Integrated.pdf](http://www.it.kth.se/~maguire/jmitola/Mitola_Dissertation8_Integrated.pdf)*