

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

А.С. Дмитриев, Л.В. Кузьмин, В.Ю. Юркин

Рассматривается и обсуждается быстро развивающееся направление в информационно-коммуникационных системах – беспроводные сенсорные сети. Особое внимание обращается на сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети, использующие в качестве носителей информации для связи между сенсорными узлами хаотические радиоимпульсы. Создание таких систем стало возможным после многолетних исследований по генерации и управлению хаосом в электронных системах.

Ключевые слова: Динамический хаос, сверхширокополосные сигналы, беспроводные сверхширокополосные системы, сенсорные сети.

Введение

Тема статьи находится на стыке нескольких научных дисциплин, каждая из которых представляет большой интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Этими дисциплинами являются.

- Нелинейная динамика – дисциплина, исследующая сложные процессы, включая динамический (детерминированный) хаос. Хаотические колебания являются носителем информации при передаче данных между сенсорными узлами в рассматриваемых сетях. Кроме того, методы нелинейной динамики широко используются при исследовании сетей, разработке методов их построения, анализе динамики и принципов адаптации к внешним условиям.

- Радиофизика – дисциплина, занимающаяся генерацией колебаний для коммуникационных систем, методами модуляции и демодуляции, излучением и приемом электромагнитных сигналов, спектрами этих сигналов, распространением электромагнитных волн. Все эти вопросы требуют переосмысления при переходе от традиционных узкополосных сигналов к сверхширокополосным (СШП) электромагнитным сигналам – новой парадигме в беспроводных коммуникациях.

- При создании и исследовании беспроводных сенсорных систем (БСС) развиваются и используются новые идеи из computer science, касающиеся, прежде всего, распределенных средств цифровой обработки информации, узлы которых снабжены вычислительными устройствами с очень ограниченными, по современным представлениям, вычислительными ресурсами и памятью. Научная сторона вопроса состоит

в том, что нужно не только организовать первичную обработку информации этими устройствами, но и создать новые типы программных средств, обеспечивающих функционирование таких многоэлементных систем, в том числе и в режимах самоорганизации. Кроме того, создаваемые программные средства должны решать ряд вспомогательных задач, обеспечивающих надежное и безопасное функционирование среды из сенсорных узлов.

- Следующая дисциплина, которую можно условно назвать сенсорикой, занимается исследованиями и разработками по сбору данных из окружающей среды (собственно сенсоры) и точечными воздействиями на окружающую среду (актуаторы). Сейчас в сенсорных системах задействованы в основном достаточно очевидные, имеющиеся «под рукой» или «на полке» типы датчиков. Вопросы построения из них сенсорных блоков, способных реагировать не только на прямые изменения регистрируемых параметров, но и определять наличие каких-то процессов по косвенным признакам представляет нетривиальную задачу сенсорики. Вместе с тем ценность результатов, получаемая при решении этой задачи, может резко возрасти при переходе к исследованию нетрадиционных процессов и оценке их характеристик. Такие ситуации могут, например, возникать при построении сенсорных сетей, предназначенных для анализа и контроля биологических объектов.

В первом разделе статьи кратко описываются идеи сенсорных сетей и начальный этап их становления как направления в информационно-коммуникационных системах. Затем во втором разделе обсуждаются основные типы СШП сигналов и идеи, связанные с применением СШП сигналов в системах беспроводной связи. В третьем разделе рассматриваются структура, принципы функционирования и примеры реализации СШП сенсорных сетей на основе хаотических радиоимпульсов. Наконец, в последнем, четвертом разделе, описывается учебно-научно-исследовательский комплекс (УНИК) «Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети», предназначенный для обучения студентов и аспирантов основам БСС, а также проведения собственных исследований в этом направлении.

1. Беспроводные сенсорные сети

Сенсорная сеть, в широком смысле этого слова, представляет собой совокупность взаимодействующих узлов, связанных с внешней средой датчиками (сенсорами). В каждом узле имеется вычислительное устройство (процессор) и приемопередатчик. Вычислительное устройство осуществляет управление узлом, включая приемопередатчик, а также первичную обработку поступающих от датчиков данных. После первичной обработки информация передается узлом по (беспроводной) коммуникационной сети в центральный пункт, где поступающая от всех узлов информация анализируется и обрабатывается в совокупности.

Современные исследования в создании беспроводных сенсорных сетей начались в первой половине 1990-х годов. Активную роль в инициализации этих работ в США сыграли такие организации-«мозговые центры», как RAND и DARPA [1]. Так, профессор Kris Pister, участник исследований в RAND, предложил в 1994 году DARPA исследовать «беспроводной интегрированный микросенсор малой мощности», в основном, как устройство, соответствующее его собственным научным интересам в технологии MEMS.

В результате этих и последующих исследований в Калифорнийском университете (Беркли) был разработан впечатляющий вариант концепции БСС, получивший

название «умная пыль» [2]. «Умная пыль» представляет собой совокупность крошечных, беспроводных сенсоров или «пылинок». Концепция предполагает, что в процессе функционирования пылинки будут находить друг друга и без вмешательства оператора организовывать коммуникационную сеть, обеспечивающую передачу поступающей от сенсоров информации в пункт управления.

Рассмотрим, как устроена пылинка, и как она работает в составе сети (рис. 1). Сенсорный блок пылинки состоит из нескольких датчиков (света, температуры, магнитного поля, давления, влажности, ускорения, др.). Наличие нескольких сенсоров позволяет надежно фиксировать изменения в среде, окружающей пылинку, как по первичным, так и по вторичным признакам. Например, в сенсорном блоке может отсутствовать датчик дыма, но начало пожара будет зафиксировано по фиксации повышения температуры и освещенности. «Мозг» пылинки реализуется с помощью микроконтроллера и/или программируемой логической интегральной схемы (ПЛИСа). Кроме того, пылинка снабжена приемопередатчиком и источником энергии. К приемопередатчику предъявляются требования низкого потребления мощности и достаточной пропускной способности для обеспечения всех необходимых обменов данными в сети. Источник питания должен при минимальных размерах обеспечивать долговременное автономное существование пылинки и ее эффективную работу

Хотя идея «умной пыли» подразумевает, что узлы должны иметь крошечные размеры, агентство DARPA, финансировавшее исследования, предложило инициаторам проекта создать прототипы пылинок на основе уже имеющейся элементной базы. Эта часть задачи была решена путем создания сенсорного узла МІСА-2 и его вариантов [3]. Характерные размеры узлов составляют несколько сантиметров, что конечно великовато для пылинок, но вполне подходит для исследовательских целей, а также для решения ряда прикладных задач.

Для достижения конечной цели – создания крошечных устройств, способных объединяться в сеть, предстоит решить ряд серьезных технических проблем. Среди них выбор и разработка каналов связи для передачи информации, приемопередатчик, а также источник питания.

В первых пылинках для этих целей использовался нелицензируемый радиоканал на частотах 433 МГц. Однако при этом размеры устройств в целом (сенсорный блок с приемопередатчиком и источником питания) определялись уже не размером сенсорного блока, а довольно значительным размером антенны, что в какой-то степени дискредитировало идею крошечных размеров. Кроме того, используемые стандартные решения не отличались низким потреблением мощности. Среди их достоинств – значительная дальность передачи.



Рис. 1. Структура «пылинки»

Осознание проблемы передачи данных привело к рассмотрению возможности применения ряда альтернативных каналов связи, включая оптические и акустические. Но все же радиоканалы являются по-прежнему предпочтительными.

Исследования в области беспроводных сенсорных сетей стали основой для разработки первого адаптированного для БСС стандарта беспроводной связи IEEE 802.15.4. и его промышленной версии ZigBee. Эти узкополосные беспроводные средства используют частотные области 868, 915 и 2400 МГц.

С целью расширения возможностей применения персональной беспроводной связи, в том числе для сенсорных сетей, в 2007 году был принят стандарт IEEE 802.15.4a, предусматривающий использование в качестве носителей информации СШП электромагнитных сигналов

2. Сверхширокополосные сигналы и беспроводные сенсорные сети

Гармонические колебания долгое время были единственным и продолжают оставаться основным типом носителя при передаче информации. Однако в последние годы эта монополия начинает подвергаться давлению со стороны сигналов других типов. Наиболее ярко как причины такого давления, так и сигналы-конкуренты гармонических колебаний проявляют себя в случае, когда речь идет о сверхширокополосной связи.

К СШП сигналам относят сигналы со средней частотой F_C и полосой ΔF , имеющие относительную полосу

$$D = \frac{\Delta F}{F_C} > 0.2 - 0.25. \quad (1)$$

В решении Федеральной комиссии США по связи 2002 года [4], заложившим основу для нелицензируемого использования СШП в средствах беспроводной связи, к сверхширокополосным сигналам отнесены 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, разработка технологии связи на которых послужила толчком для развития СШП технологий в целом. Затем появились и другие СШП технологии, часть из которых к настоящему времени уже вошли в стандарты связи.

Список сверхширокополосных беспроводных технологий сегодня выглядит примерно так:

1. Ультракороткие импульсы [5, 6]. Длительность импульсов зависит от используемого диапазона частот, но обычно составляет от 100 до 2000 псек. Свойством этих сигналов является жесткая связь длительности импульса с шириной спектра мощности и характерная форма спектра мощности, простирающаяся от 0 до частоты примерно $f = 1/T$, где T – длина ультракороткого импульса. База сигнала $B \sim 1$.

2. Короткие радиоимпульсы – цуги колебаний [7]. В рамках данного подхода сигнал формируется в заданной полосе частот. Однако, как и в случае ультракоротких импульсов, имеет место жесткая связь между длиной импульса и спектром мощности сигнала. В интересах получения более равномерной спектральной плотности в полосе частот форма огибающей импульса выбирается колоколообразной. База сигнала $B \sim 1$.

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. База сигнала может меняться в широких пределах.

4. Пачки коротких импульсов [6]. Как и в случае единичного короткого импульса, форма одинаковых импульсов согласуется с заданной полосой частот. База сигнала пропорциональна числу импульсов в пачке.

5. Сигналы с прямым расширением спектра. Это решение предполагает «нарезку» синусоидального сигнала на очень короткие фрагменты – «чипы» [10]. Для передачи одного бита используется серия «чипов». В пределе, при использовании одного «чипа» для передачи одного бита информации, технология смыкается с технологией коротких радиоимпульсов. База сигнала равна числу «чипов», используемых для передачи одного бита информации.

6. Сигналы с ортогональной частотной модуляцией – OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) [11]. Этот тип сигналов давно и успешно применяется в радиосвязи. Особенностью его использования в СШП системах является большая ширина спектра (примерно, 500 МГц) по сравнению с OFDM сигналами, применявшимися ранее.

7. Сверхширокополосные сигналы на основе частотной модуляции – FM UWB (frequency modulation ultrawide band) [2, 12]. Эти сигналы формируются за счет сканирования частоты в генераторах управляемых напряжением. 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 будет равна

$$B = \Delta T \cdot \Delta F, \quad (2)$$

где ΔT – длина импульса, ΔF – полоса частот перестройки.

Этот список можно продолжить.

Следует отметить, что основная идея массового гражданского применения СШП связи была тесно связана с импульсной сверхширокополосной технологией и заключалась в том, чтобы создать беспроводные средства связи чрезвычайно простые и дешевые. Действительно, в схемах связи с ультракороткими импульсами все выглядит очень просто: «1» передаются импульсами, «0» – отсутствием импульсов на заданных временных позициях. Любое усложнение этой схемы ведет к увеличению стоимости приемопередатчиков и снижению экономической привлекательности. Но даже в такой, на первый взгляд, простой схеме передачи информации есть проблемы, решение которых требует немалой изобретательности. Такой проблемой, в частности, является синхронизация передатчика и приемника. Например, для того, чтобы эффективно осуществить когерентный прием, необходимо обеспечить синхронизацию с точностью не хуже 10 пикосекунд при 150 пикосекундной длине импульса. Это непростая задача и ее имеющиеся решения требуют значительного потребления энергии и достаточно сложной схемотехники.

В целом, использование сверхширокополосных сигналов для межузловых коммуникаций в беспроводных сенсорных сетях выглядит очень привлекательным:

- оно позволяет создать устройства малых размеров, а также обеспечивает высокие коммуникационные характеристики в реальных каналах в условиях многолучевых искажений;

- в СШП БСС узлы могут контактировать только с близлежащими соседями и, благодаря низкой мощности, избегать межузловой интерференции, которая существует в узкополосных системах.

Однако, несмотря на все достоинства, которые СШП технология предоставляет при разработке БСС, она порождает и уникальную совокупность проблем. Так, использование в качестве СШП сигналов маломощных ультракоротких или коротких импульсов с базой сигнала $B \sim 1$ порождает проблему масштабирования в БСС.

Дело в том, что при увеличении расстояния между узлами или при увеличении числа узлов, слабые СШП импульсы не могут надлежащим образом передавать информацию между узлами. Кроме того, как отмечалось выше, малая длительность СШП импульсов вызывает большие проблемы в синхронизации для сенсорных узлов в беспроводной сети. Еще одна проблема с использованием СШП технологии заключается в интерференции со стороны мощных узкополосных сигналов, которые разделяют спектральную область с маломощными СШП импульсами [13]. К тому же детектирование обычно предполагает использование классической техники согласованной фильтрации, где получаемый сигнал коррелируется с копией СШП импульса, генерируемого в приемнике. Поэтому эффекты воздействия канала (такие как многолучевое распространение) на принимаемый сигнал могут приводить к существенной деградации процесса детектирования из-за низкой корреляции между заранее определенной копией сигнала и искаженным принимаемым сигналом.

Покажем, что большинство этих проблем успешно решаются при использовании в качестве носителей информации СШП хаотических радиоимпульсов.

3. Сверхширокополосная связь на основе хаотических радиоимпульсов

Прямохаотической схемой связи называется [14–17] схема связи в которой:

- а) источник хаоса генерирует хаотические колебания непосредственно в заданной микроволнового диапазона частот;
- б) ввод информационного сигнала в хаотический осуществляется путем формирования соответствующего потока хаотических радиоимпульсов;
- в) извлечение информации из СВЧ-сигнала производится без промежуточного преобразования частоты.

В прямохаотических системах связи могут использоваться различные виды модуляции: наличие или отсутствие хаотического импульса на информационной позиции (chaotic on-off keying, COOK), относительная хаотическая манипуляция (differential chaotic shift keying, DCSK), модуляция позиций импульсов (pulse position modulation, PPM) и т.д. Существенно, что для передачи информации здесь используется не непрерывный сигнал, а поток импульсов. Поэтому наряду с методом модуляции важными характеристиками являются длина импульса и скважность. Вариация этих характеристик определяет скоростные свойства системы связи и ее устойчивость для различных типов каналов связи.

Теоретический анализ, подтвержденный результатами конкретных разработок, показывает, что прямохаотическая передача информации имеет привлекательные характеристики для низкоскоростных (до 1 Мбит/с) и среднескоростных (до 50 Мбит/с) систем СШП связи.

К настоящему времени разработано несколько типов СШП прямохаотических приемопередатчиков.

Так приёмопередатчик ППС-40 предназначен для экспериментов с сенсорами и построения лабораторных сенсорных сетей. Он имеет радиус действия до 15-20 м и используется в качестве средства связи между сенсорами, а также между сенсорами и компьютером. Устройство обладает интерфейсами RS232 и UART, позволяющими подключать различные внешние устройства (сенсоры, аудио- или видеоисточ-

ники сигнала) и организовывать экспериментальные сенсорные сети. Внешний вид приёмопередатчика показан на рис. 2. Сверхвысокочастотная 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 [18–22].

Для приемопередатчика была разработана высокоэффективная всенаправленная микрополосковая антенна, выполненная на единой плате с остальной частью устройства.

Приёмник огибающей сигнала создан на основе логарифмического детектора. Оригинальность приемника заключается в том, что в нем отсутствует отдельная система автоматической регулировки усиления принимаемого сигнала. Регулирование усиления входного сигнала осуществляется самим логарифмическим детектором, имеющим динамический диапазон 50 дБ. Минимальная длительность импульса, который приёмник способен детектировать, составляет 20 нс.

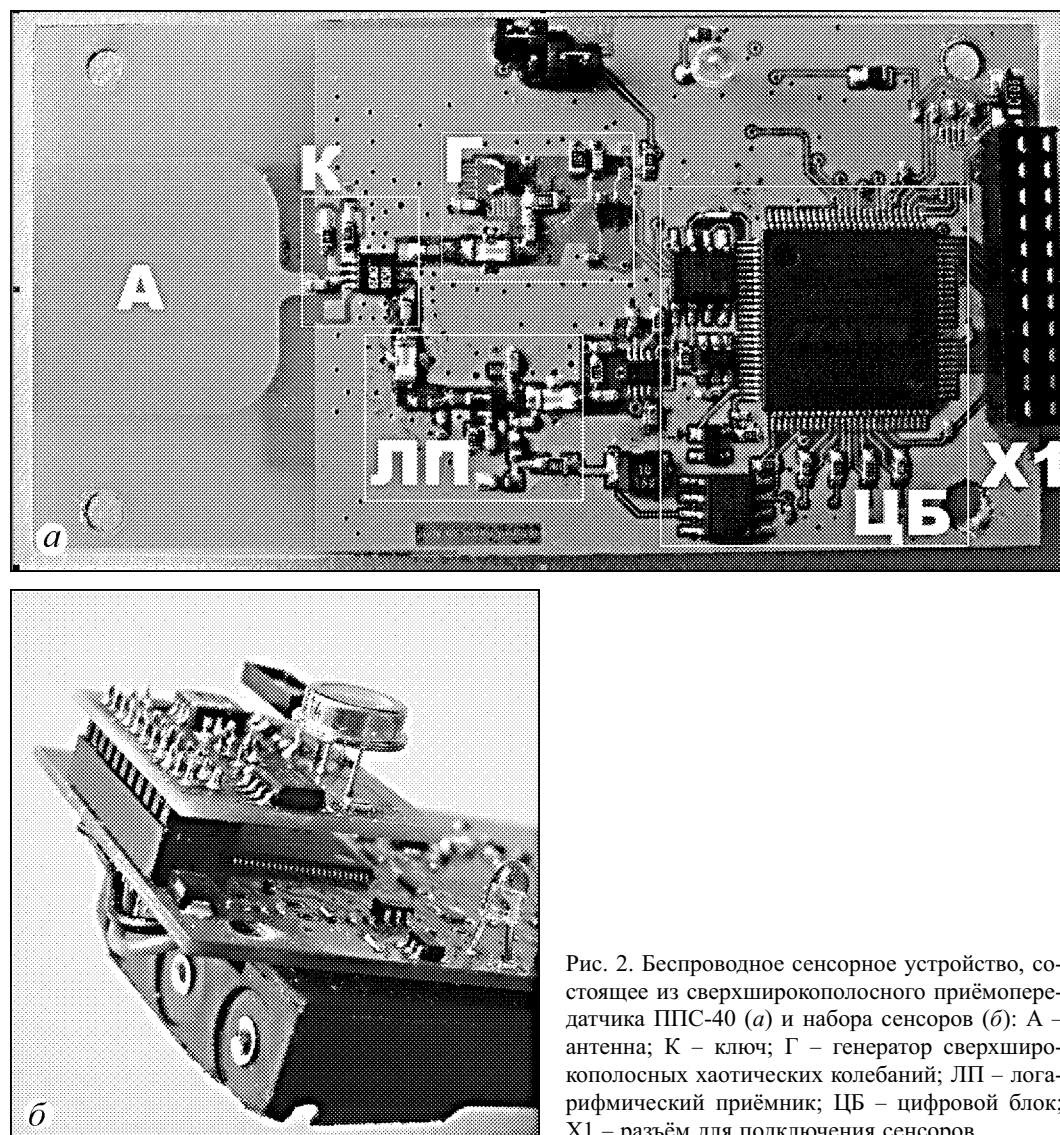


Рис. 2. Беспроводное сенсорное устройство, состоящее из сверхширокополосного приёмопередатчика ППС-40 (а) и набора сенсоров (б): А – антенна; К – ключ; Г – генератор сверхширокополосных хаотических колебаний; ЛП – логарифмический приёмник; ЦБ – цифровой блок; X1 – разъём для подключения сенсоров

Другой тип приемопередатчика, ППС-50, предназначен для использования в беспроводных сенсорных сетях, размещаемых на достаточно больших территориях. Пара таких приемопередатчиков, один из которых связан с сенсором по UART интерфейсу, а второй используется либо в качестве терминального устройства, либо в качестве ретранслятора, образует радиомост. Устройство способно работать на расстояниях до 40–50 м, что примерно в три раза больше, чем дальность действия приемопередатчика ППС-40. Это достигается за счет применения источника динамического хаоса с повышенной мощностью, использования приемника с большей чувствительностью и слабонаправленной антенной системы с двумя полудиполями (рис. 3).

Специфика работы сенсорной сети требует возможности длительного функционирования СШП приемопередатчика без замены источников питания. Поэтому при разработке приемопередатчика ППС-50 большое внимание было уделено энергосбережению и, в частности, спящим режимам.

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

- глубокий спящий режим;
- спящий режим;
- режим приема информации от сенсора и излучения сигнала в окружающее пространство;
- режим ретрансляции.

В глубоком спящем режиме приемопередатчик периодически (1 раз в 100 с) прослушивает эфир и ждет поступления команды для перехода в другой режим работы. Периодичность прослушивания резко снижает долю времени активной работы устройства, позволяет экономить энергию батарей и обеспечивает автономную работу приемопередатчика до трех лет.

В спящем режиме периодичность прослушивания составляет один раз в секунду, что дает возможность оперативно управлять режимом работы приемопередатчика во время его активного использования.

В режиме приема информации от сенсора приемопередатчик преобразует полученную информацию в последовательность хаотических радиоимпульсов и транслирует их в окружающее пространство.

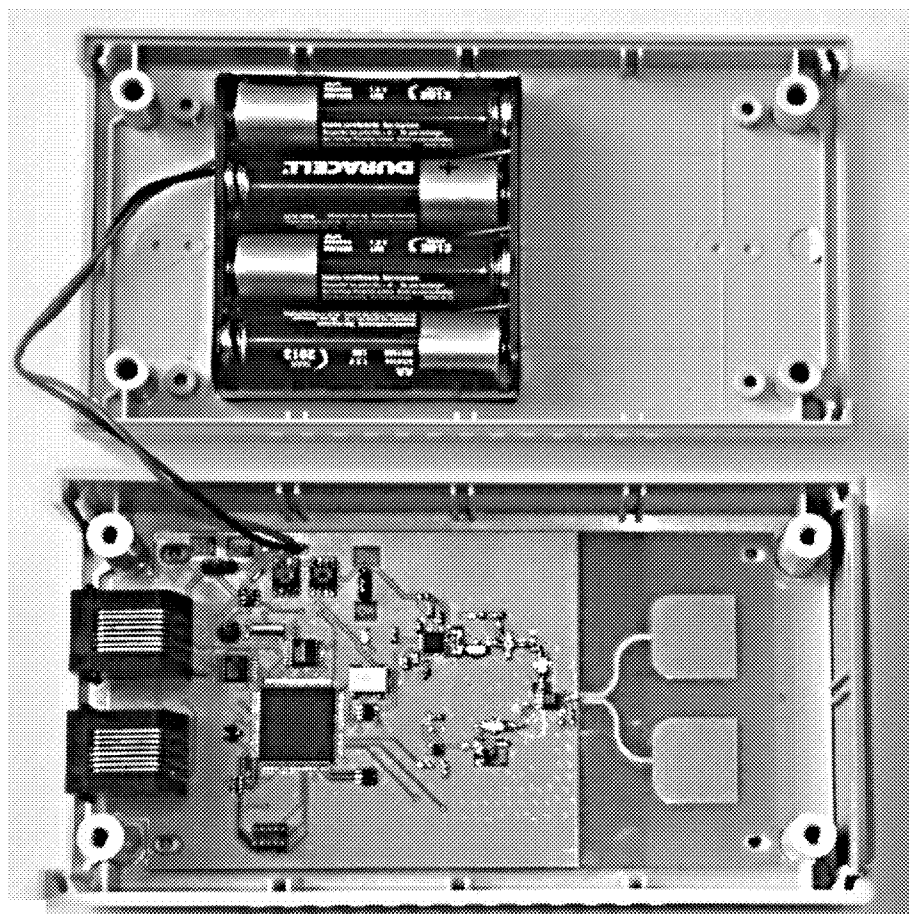
В режиме ретрансляции приемопередатчик непрерывно прослушивает эфир в ожидании поступления данных или управляющих команд. Принятые данные обрабатываются и переизлучаются в пространство.

Рассмотрим применение описанных выше СШП приемопередатчиков ППС-50 в сенсорной сети на примере беспроводной связи для системы мониторинга технического состояния Крытого конькобежного центра в Крылатском (рис. 4).

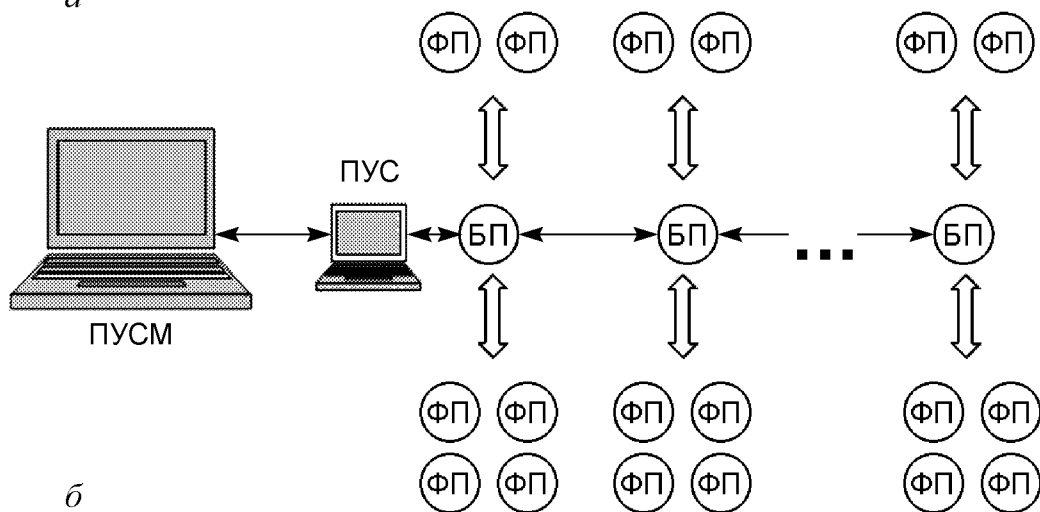
Беспроводная система мониторинга должна определять состояние конструкций сооружения, в том числе полукольцевой железобетонной балки и несущих ферм, поддерживающих крышу, на основе данных поступающих от сенсоров вибраций.

Сверхширокополосная беспроводная система связи включает в себя 57 приемопередатчиков, расположенных на фермах сооружения вместе со станциями мониторинга (сенсоров), и 20 приемопередатчиков, расположенных на полукольцевой балке.

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



a



б

Рис. 3. *a* – Внешний вид беспроводного сверхширокополосного приёмопередатчика ППС-50; *б* – структура сенсорной сети в Крытом конькобежном центре в Крылатском (Москва): ФП – фермовый приёмопередатчик, БП – балочный приёмопередатчик, ПУС – пульт управления сетью, ПУСМ – пульт управления системой мониторинга



Рис. 4. Монтаж беспроводной сенсорной сети в Крылатском

данных, передачи этих данных на центральный пункт управления и выключения станций мониторинга.

Устройства на полукольцевой балке используются как ретрансляторы при передаче команд от центрального пункта управления к станциям мониторинга, расположенным на фермах, и 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. 3, б).

Каждый из приемопередатчиков на балке является ретранслятором (репитером) для определенной группы приемопередатчиков на фермах. Все приемопередатчики системы имеют встроенные источники питания, обеспечивающие их длительную автономную работу.

Основную часть времени система находится в спящем состоянии (глубоко спящий режим) и потребляет минимальную мощность. Перед очередным сеансом мониторинга производится «побудка» системы, путем передачи специальных служебных пакетов к ретрансляторам, и затем ко всем устройствам, размещенным на фермах. В результате через несколько десятков секунд система оказывается готовой к работе. Опрос сенсорных узлов на фермах производится последовательно. Цикл измерений каждого сенсора длится около минуты. Поступающая информация передается в компьютер и обрабатывается специальной программой. По результатам обработки принимается решение о состоянии элемента конструкции и его изменении по сравнению с предыдущими мониторингами.

4. Учебно-научно-исследовательский комплекс

Для работы с новой техникой, к которой относятся беспроводные сенсорные сети необходимо производить обучение ее будущих разработчиков и потребителей на этапе обучения в вузах. Для решения этой задачи в рамках аналитической целевой программы «Развитие потенциала высшей школы» на 2006–2007 годы в МФТИ совместно с ИРЭ РАН и ООО «Нанохаос» был разработан УНИК «Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети» (рис. 5), включающий в себя сверхширокополосные прямохаотические передатчики, сенсорные блоки с датчиками температуры, влажности, освещенности и ускорения, программное обеспечение, методические материалы и описание комплекса лабораторных работ.

Кроме чисто учебных вопросов с помощью комплекса могут решаться исследовательские задачи по построению и применению сенсорных сетей, включая разра-

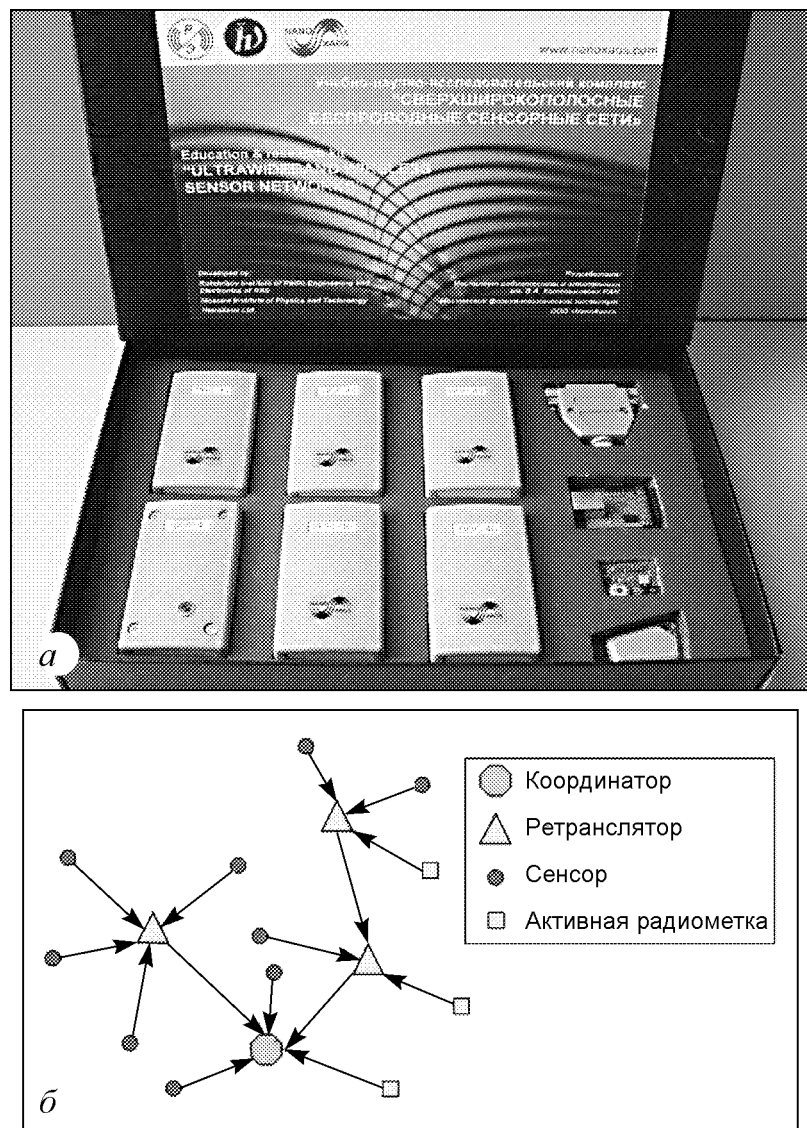


Рис. 5. *a* – Учебно-научно-исследовательский комплекс (УНИК) «Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети»; *б* – структура сети, которая может быть развёрнута на основе этого комплекса

ботку и подключение новых сенсорных блоков, разработку новых алгоритмов функционирования сетей и др. В настоящее время начата поставка этих комплексов в вузы Российской Федерации и ряда зарубежных стран.

5. «Умная пыль» как концентратор нанотехнологий

Сверхширокополосные сенсорные сети используют приемопередатчики с малым радиусом действия. При этом, если мощность излучения сотовых телефонов составляет $100 \div 300$ мВт, систем типа Wi-Fi – 100 мВт, а систем типа Bluetooth – $1 \div 10$ мВт, то мощность излучения сверхширокополосных устройств связи менее 100 мкВт. Это означает, что для передачи одного бита информации сотовый телефон излучает $10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-7}$ Дж, передатчик Wi-Fi – 10^{-8} Дж, передатчик Bluetooth – $10^{-9} \div 10^{-8}$ Дж, а сверхширокополосный передатчик $10^{-12} \div 10^{-10}$ Дж. Таким образом, энергия, излучаемая сверхширокополосным передатчиком на передаваемый бит, меньше 1.0 нДж, в то время как в других современных системах связи она больше 1.0 нДж.

Радиотехнологии, в которых используются сверхнизкие уровни излучаемой энергии на бит передаваемой информации, уместно называть субнано радиотехнологиями или просто нанорадиотехнологиями. Разработка нанорадиотехнологий требует постановки и решения ряда новых радиофизических проблем, связанных с генерацией сигналов очень малой мощности, излучением их с помощью компактных антенн, распространением этих сигналов в специфических средах на малые расстояния и эффективным приемом с малыми энергетическими затратами.

На наш взгляд, сенсорным сетям предстоит сыграть роль консолидирующего начала – «концентратора» для нанотехнологий, связанных с обработкой и передачей информации. Действительно, сами по себе электронные элементы наноразмеров работать не будут. Для эффективного использования они должны быть интегрированы в функциональные блоки, а те, в свою очередь, в законченные устройства и системы.

Беспроводные сенсорные сети типа «умной пыли» являются как раз системами, состоящими из сверхминиатюрных однотипных интеллектуальных узлов (систем), которые могут быть реализованы только с применением нанотехнологий, и будут тиражироваться миллиардами и десятками миллиардов штук. Вот почему вполне оправданно рассматривать такие системы как «концентраторы» нанотехнологических решений.

Заключение

Беспроводная сенсорная сеть представляет собой совокупность вычислительных устройств (микроконтроллеров), каждое из которых связано с внешней средой датчиком, от которого поступает информация (и возможно исполнительным устройством – актуатором). 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 представляет собой распределенную интеллектуальную систему, элементы которой осуществляют взаимодействие с внешней

средой. Это качественно новый тип информационно-вычислительной системы по отношению к обычным компьютерам. Он способен стать основой для чрезвычайно перспективного технологического направления, способного оказать революционное воздействие на все сферы жизни, подобно тому, как в предыдущие десятилетия это сделала компьютерная техника. Для развития сенсорных технологий, так же как в свое время для развития компьютерной техники, решающее значение наряду с «железом» будет иметь программное обеспечение в традиционном варианте, или в тех вариантах, которые придут ему на смену: адаптивное, дистанционное, самопрограммирующееся и т.д. Те структуры и организации, которые создадут и «навяжут» эти продукты миру будут иметь громадные финансовые средства и огромное технологическое преимущество.

Рассмотренные в статье сверхширокополосные средства и сети, вместе с программными средствами для них, находятся в начале своего развития, большие компании и организации в этой ситуации, как показывает опыт, не имеют значительных преимуществ перед компактными инновационными структурами, и игра для молодых и дерзающих стоит свеч.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 09-02-00983-а и № 09-07-92651-ИНДа.

Библиографический список

1. Wireless sensor networks – a mission to the USA. Report of DTI global watch mission. November 2005.
2. *Doherty L., Warneke B.A., Bozer B.E., Pister K.S.J.* Energy and performance consideration for smart dust // Int. Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks. 2001. Vol. 4, № 3. P. 121.
3. Crossbow Technology Inc. MTS/MDA Sensor Board Users Manual. San Jose: 2007. http://www.xbow.com/support/Support_pdf_files/MTS-MDA_Series_Users_Manual.pdf
4. New public safety applications and broadband Internet access among uses envisioned by FCC authorization of ultra-wideband technology. / FCC Release News. Feb. 14, 2002.
5. *Win M.Z., Scholtz R.A.* Impulse radio: How it works // IEEE Commun. Lett. 1998. Vol. 2. P. 10.
6. *McCorkley J.* A Tutorial on ultra wideband technology // IEEE 802.15 Working Group, submission. N.Y.: IEEE, 2000. http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2000/Mar00/00082rP802-15_WG-UWB-Tutorial-1-XrteamSpectrum.pdf
7. *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/Mar03/03143r2P802-15TG3a-TimeDomain-CFP-Presentation.ppt>
8. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О., Кяргинский Б.Е.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2001. Т. 46, № 2. С. 224.

9. *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Пузиков Д.Ю., Старков С.О.* Эксперименты по сверхширокополосной прямохаотической передаче информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2002. Т. 47, № 10. С. 1219.
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. 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-Document.pdf.
12. *Lampe J.* Introduction to Chirp Spread Spectrum (CSS) Technology. N.Y.: IEEE, 2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2004/15-04-0353-00-004a-chirp-spread-spectrum-technology.ppt>
13. *Gerrits J.F.M., Kouwenhoven M. H. L., Van der Meer P. R., Farserotu J.R., Long J.R.* Principles and Limitations of Ultra-Wideband FM Communications Systems // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2005. № 3. P. 382.
14. *Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I., Starkov S.O.* Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, №6. P. 1495.
15. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. Панас А.И., Старков С.О., Хилинский А.Д.* Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса // РЭ. 2006. Т. 51, № 10.
16. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. и др.* Сверхширокополосные коммуникационные системы на основе динамического хаоса. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. №1. С. 4.
17. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М. и др.* Технологическая платформа для создания приемопередатчиков на основе хаотических сигналов. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 77.
18. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.* Генерация последовательности хаотических импульсов при воздействии периодического сигнала на динамическую систему // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 22. С. 29.
19. *Дмитриев, А.С., Ефремова, Е.В., Кузьмин, Л.В., Атанов, Н.В.* Генерация потока хаотических импульсов в динамической системе с внешним (периодическим) воздействием // РЭ. 2006. Т.51, вып. 5. С. 593.
20. *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* Формирование хаотических радиоимпульсов в генераторе с внешним периодическим воздействием // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, №15. С. 1.
21. *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А.* Генератор хаотических колебаний радиодиапазона на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы // Известия вузов. ПНД. 2007. Т. 15, № 1. С. 23.
22. *Dmitriev A., Efremova E., Kuzmin L., Atanov N.* Forming pulses in non-autonomous chaotic oscillator // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2007. Vol. 17, № 10. P. 1.

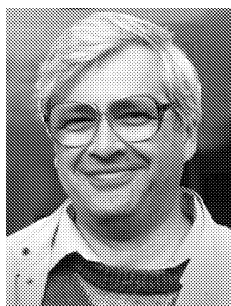
Поступила в редакцию 6.07.2009

ULTRAWIDEBAND WIRELESS SENSOR NETWORKS BASED ON CHAOTIC RADIOPULSES

A.S. Dmitriev, L.V. Kuzmin, V.Yu. Yurkin

Wireless sensor networks that is a fast emerging branch of modern telecommunications are considered in this paper. Particular attention is paid on ultrawideband sensor networks where chaotic radiopulses are used as an information carrier between sensor nodes. Development of such wireless sensor networks became possible after long-term investigations of chaotic oscillations and chaos control.

Keywords: Dynamical chaos, ultrawideband signals, wireless ultrawideband systems, sensor networks.



Дмитриев Александр Сергеевич – окончил факультет общей и прикладной физики Московского физико-технического института (1971). Ведущий научный сотрудник, зав. отделом ИРЭ РАН. Кандидат физико-математических наук (1974), доктор физ.-мат. наук (1988), профессор (с 1995). Дважды лауреат Премии Совета Министров СССР (1984, 1989). Автор более 140 научных трудов.

125009 Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

E-mail: chaos@cplire.ru



Кузьмин Лев Викторович – окончил МФТИ. Научный сотрудник ИРЭ РАН. Кандидат физико-математических наук (2000). Имеет более 40 научных трудов.

125009 Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

E-mail: chaos@cplire.ru



Юркин Виталий Юрьевич – родился в 1985 году в Волгограде, окончил Московский физико-технический институт (2008). Аспирант МФТИ. Работает в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

125009 Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: vitalik2002@gmail.com