

# Сверхширокополосные прямохаотические беспроводные сенсорные сети

А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, А.В. Клецов, Л.В. Кузьмин

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Москва, ул. Моховая, 11/7, chaos@cplire.ru*

*Рассматривается и обсуждается быстро развивающееся направление в информационно-коммуникационных системах – беспроводные сенсорные сети (БСС). Особое внимание обращается на сверхширокополосные БСС, использующих в качестве носителей информации для связи между сенсорными узлами хаотические радиопульсы.*

*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.*

## Введение

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 БСС начались в первой половине 90-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 беспроводных сенсорных сетей, 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.

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 MICA-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 значительным размером антенны, что в какой-то степени дискредитировало идею крошечных размеров. Кроме того, используемые решения не отличались низким потреблением мощности. Среди их достоинств - значительная дальность передачи.

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 явились 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 сверхширокополосных (СШП) электромагнитных сигналов.

### **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 подвергается 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 сверхширокополосным (СШП) сигналам относят сигналы со средней частотой  $F_c$  и полосой  $\Delta F$ , 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 сигналов 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 СШП 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. База сигнала  $B \sim 1$ .
2. Короткие радиоимпульсы – цуги колебаний [7]. В рамках данного подхода сигнал формируется в заданной полосе частот. База сигнала  $B \sim 1$ .
3. Хаотические радиоимпульсы [8, 9]. База сигнала может меняться в широких пределах.
4. Пачки коротких импульсов [6]. 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]. База сигнала равна числу «чипов», используемых для передачи одного бита информации.

6. Сигналы с ортогональной частотной модуляцией (OFDM –Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

7. Сверхширокополосные сигналы на основе частотной модуляции (FM UWB – Frequency Modulation UWB). В этом случае база сигнала будет равна

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

где  $\Delta T$  - длина импульса;  $\Delta F$  - полоса частот перестройки.

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 синхронизации передатчика и приемника. Например, для того, чтобы эффективно осуществить когерентный прием необходимо обеспечить синхронизацию с точностью не хуже 10 псек 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. К тому же детектирование обычно представляет собой 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.

### **Сверхширокополосная связь на основе хаотических радиоимпульсов**

Прямохаотической схемой связи (ПХС) называется схема связи в которой:

- а) источник хаоса генерирует хаотические колебания непосредственно в заданной полосе 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/сек) и среднескоростных (до 50 Мбит) 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 видео- источники сигнала) и организовывать экспериментальные сенсорные сети. СВЧ часть передатчика реализована в виде транзисторного генератора хаоса. Для формирования хаотических радиоимпульсов используется внутренняя модуляция сигнала генератора.

Приёмник огибающей сигнала создан на основе логарифмического детектора. Оригинальность приемника заключается в том, что в нем отсутствует отдельная система автоматической регулировки усиления принимаемого сигнала (АРУ). Регулирование усиления входного сигнала осуществляется самим логарифмическим детектором, имеющим динамический диапазон 50 дБ.

Другой тип приемопередатчика (ППС-50) предназначен для использования в БСС, 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 метров, что примерно в три раза больше, чем дальность действия приемопередатчика ППС-40.

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.

Для работы с новой техникой, к которой относятся БСС необходимо производить обучение ее будущих разработчиков и потребителей на этапе обучения в ВУЗах. Для решения этой задачи был разработан учебно-научно-исследовательский комплекс (УНИК) «Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети», включающий в себя сверхширокополосные прямохаотические приемопередатчики, 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 разработку и подключение новых сенсорных блоков, разработку новых алгоритмов функционирования сетей и др.

### **Заключение**

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.

Рассмотренные в статье СШП 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, № 09-07-92651-ИНД\_а и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МД-4131.2009.9).

### **Литература**

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. // Int. Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks. 2001. V. 4, No. 3. P. 121-133.
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](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. // 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](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. // РЭ. 2001. Т. 46, № 2. С. 224.
9. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И. и др.// РЭ. 2002. Т. 47. №10. С. 1219.
10. TG4a Proposal for Low Rate DS-UWB. N.Y.: IEEE, 2005. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2005/15-05-0021-00-004a-low-rate-ds-uwb-tg4a.ppt>.