

# УДК 004

**Концепция организации беспроводных сенсорных сетей и их применение # 09, сентябрь 2012**

Смурыгин И.М.

*Научный руководитель к.т.н., доц. Власов А.И. МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

# Введение

В настоящее время большую популярность приобретают сенсорные беспроводные системы, так как они предоставляют ряд преимуществ потребителю. Но из-за новизны данного вида сетей возникают некоторые сложности при их проектировании.

В данной статье приведены основные принципы функционирования сенсорных беспроводных сетей, а также методы передачи информации при помощи протокола Zigbee.

# Анализ сенсорных систем и их применение

Сенсорные сети необходимы для преобразования информации, полученной в результате наблюдения за физическим объектом, в форму, которая может быть использована для хранения информации и ее последующим преобразованием. По результатам обработки информации может быть выработано управляющее воздействие.

*Сенсор* – объект, который используется для сбора информации о физическом объекте или процессе, включая появление определенных событий (таких как, изменение состояния – изменение температуры или давления) [1]. У человека функцию сенсоров выполняют глаза (восприятие оптической информации), уши (получение акустической информации) и нос (получение информации о запахе).

Также часто используется термин датчик (transducer). *Датчик* – устройство, которое используется для преобразования одного вида энергии в другой [1]. Следовательно, сенсор также является датчиком, который преобразует физическую информацию в электрическую. Далее она может быть передана вычислительной системе или контроллеру для вычислений. Основные шаги, выполняемые при работе сенсорных сетей, представлены на рисунке 1 [1].

Процесс

|  |
| --- |
| Сенсор Преобразование Аналогово-цифровой сигнала преобразователь  **Сбор информации**  **Выработка управляющих сигналов**  Активатор Преобразование Цифро-аналоговый  сигнала преобразователь  **Активация** |
| Рис. 1 Процесс сбора данных информации и активации процесса в сенсорных  сетях |

Какое-либо явление в физическом мире наблюдается при помощи сенсора. Полученные электрические сигналы от сенсора часто не готовы для вычислений, поэтому они проходят через стадию преобразования сигнала. На этой стадии может быть осуществлен ряж преобразований, необходимых для дальнейшего использования сигнала. Например, сигнал часто требует усиления, для увеличения амплитуды, затем применяются фильтры для устранения нежелательного шума в определенных промежутках частот. Преобразованный сигнал трансформируется при помощи АЦП в цифровой сигнал. Таким образом, сигнал доступен в цифровой форме и готов к дальнейшему вычислению, хранению и визуализации.

Важное значение при разработке структуры беспроводных сенсорных сетей играет метод построения сети. Классификация методов построения представлена в CMAP-карте на рисунке 2.

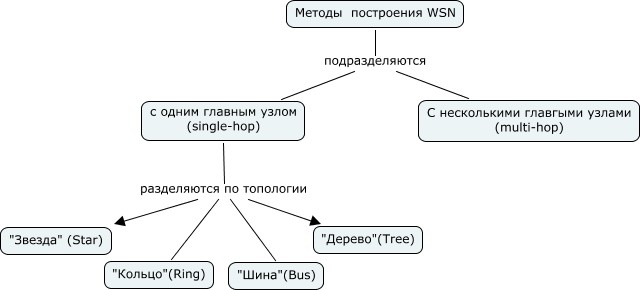


Рис. 2 CMAP-карта классификации методов построения сенсорных интеллектуальных сетей

Все методы построения можно объединить в две группы:

* *с одним главным узлом* (*single-hop*). Используется, когда мощность передатчика сенсора достаточна для передачи сигнала к базовой станции.
* *с несколькими главными узлами* (*multi-hop*). В данной топологии некоторые узлы не только собирают информацию о наблюдаемом процессе, но и сбирают информацию от других узлов.

Подробная графическая интерпретация методов построения представлена на рисунке 3.



|  |
| --- |
| Узел сбора информации  **Топология**  **«Звезда»(Star)**  Базовая **Топология**  станция **«Кольцо»(Ring)**  **Топология**  **«Сеть»(Mesh)**  **Топология Топология**  **«Шина»(Bus) «Дерево»(Tree)** |
| Рис. 3 Графическая интерпретация методов построения сенсорных интеллектуальных сетей |

Из сравнения двух видов топологий сетей отчетливо видны их достоинства и недостатки. Достоинства и недостатки сенсорных сетей в зависимости от способа их построения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки сенсорных сетей в зависимости от способа их построения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Критерий сравнения** | **Сетевая топология с одним главным узлом** | **Сетевая топология с несколькими главными узлами** |
| *Надежность* | Выход из строя главного узла приведет к неработоспособности сети | Выход из строя одного из главных узлов не приведет к неработоспособности сети. Главные узлы настраиваются на новый маршрут передачи данных и сеть выполняет  необходимые операци |
| *Стоимость* | Сложное мощное вычислительное устройство в одном узле  – базовой станции. Высокая стоимость | Более простые вычислительные устройства в нескольких узлах. |
| *Энергопотребление* | Установка мощных приемо-передающих устройств на базовой станции.  Большой расход энергии | Установка нескольких слабых приемо- передающих устройств.  Работа узлов только в некоторый промежуток времени, необходимый для передачи информации (*wakeup on demand*[3]). Экономия энергии до 70%[2] |

Таблица 1 – продолжение

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Критерий сравнения** | **Сетевая топология с одним главным узлом** | **Сетевая топология с несколькими главными узлами** |
| *Масштабируемость* | Усложнена из-за лимита | Может поддерживать тысячи |
|  | приема-передачи | индивидуальных устройств. |
|  | информации по | Добавление нового устройства в сеть |
|  | расстоянию главным | происходит просто его включением без |
|  | узлом | определенного местоположения. |

Сети с несколькими главными узлами являются более эффективными по ряду показателей

Данные виды сетей называют *интеллектуальными*. Т.е. в них заложены следующие функциональная возможность самоуправления. Устройство собирает информацию о своих соседях, адаптируется к изменениям в окружающей среде и формирует соединения между узлами топологии, в зависимости от состояния соседних узлов.

# Основные принципы передачи информации при помощи технологии Zigbee

Имеются различные стандарты для передачи данных по сети, видеоданных и другие, однако, до сегодняшних дней не было стандарта, который бы удовлетворял требованиям сенсорных беспроводным сетям. Они не требуют высоких скоростей передачи, но при их работе необходимы низкие задержки при передаче информации, низкое энергопотребление и невысокая стоимость. Так как ни один стандарт не удовлетворял данным требованиям, то был разработан комплект протоколов и расширений для передачи данных в сенсорных беспроводных сетях, которые вошли в стандарт IEEE 802.15.4. Если быть точным, то консорциум компаний ZigBee Alliance разработал комплект протоколов и расширений, дополняющих международный стандарт IEEE 802.15.4.

Согласно определению IEEE 802.15.4 — это стандарт для низкоскоростных частных радиосетей — *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN), которые обеспечивают беспроводную связь в различных приложениях с ограниченным энергопотреблением, ограниченной пропускной способностью, при передаче информации на небольшие расстояния от нескольких метров до сантиметров.

Основными преимуществами LR-WPAN являются:

* + простота установки;
  + надежная передача данных;
  + небольшая дальность действия;
  + низкая по сравнению с аналогами цена;
  + продолжительное время работы от батарейки.

Согласно стандарту[x] сенсорная беспроводная система состоит из нескольких компонентов. Основными компонентами являются два типа устройств:

**FFD-устройства** (*full function device*). Может выступать в качестве:

* PAN-координатор (*personal area network coordinator*). Наиболее дорогой тип устройств, так как он должен содержать всю информацию о сетевых соединениях, иметь большой объем памяти и высокую производительность;
* координатор. Координатор может реализовывать функции ретранслятора, моста, маршрутизатора и шлюза;
* конечное устройство.

**RFD-устройства** (*reduced function device*). Могут выступать только в роли конечного устройства. Могут сообщаться только с FFD-устройствами. Применяются в простых приложениях, таких как управление светом. RFD-устройствам не нужно

передавать большой объем информации и они могут сообщаться только с одним FFD устройством в определенный момент времени.

Минимальное количество устройств в сети LR-WPAN — 2. Причем в любой сети должно быть по крайней мере одно FFD-устройство, работающее в качестве PAN- координатора. FFD-устройства могут сообщаться с RFD-устройствами или другими FFD- устройствами.

Выбираемый вид топологии зависит от требований приложения. Стандарт IEEE

* + 1. в LR-WPAN сетях предусматривает применение двух видов топологий: топология «Звезда» (*star topology*) и топология с децентрализованным управлением (*peer- to-peer topology*). Примеры реализаций данных видов топологий представлены на рисунке 4.



|  |
| --- |
| **Топология Топология с децентрализованным**  **«Звезда» (Star) управлением (Peer-to-peer)**  PAN-координатор  PAN-координатор   * Устройство с полным набором функций * Устройство с ограниченным набором функций * Потоки данных |
| Рис. 4 Пример реализации топологии вида «Звезда» и топологии с децентрализованным управлением |

В топологии «Звезда» связь осуществляется между несколькими устройствами и единственным центральным контроллером, который называется PAN-координатор. Часто для питания PAN-координатора используется постоянный источник питания, когда остальные узлы питаются от батареек. Топология «Звезда» используется для построения домашних систем автоматического контроля, управления периферией домашних персональных компьютеров и игр.



Топология с децентрализованным управлением отличается тем, что каждое устройство может взаимодействовать с другим устройством на расстоянии, на котором возможно произвести обмен при помощи приемопередающего устройства. Данный вид топологии позволяет построить более сложные конфигурации сетей. Например, данный вид топологии может быть применен для построения систем производственного контроля и мониторинга, **беспроводных сенсорных сетей**, перевозки хрупких товаров и систем умного сельского хозяйства. Топология с децентрализованным управлением может быть самоорганизующейся и иметь возможность автоматического ремонта. Примером применения данного вида топологии может служить структура сети в виде кластерного дерева. Вид данной сети представлен на рисунке 5[2].

|  |
| --- |
| 5  4  1 6  2  *PAN ID 1* 5 *PAN ID 2 PAN ID 4*  2 0  6 5 1 3  3 4 6  1 7 0 0  **PAN-** 8 2 7 2  **координатор** 1 *PAN ID 3*  0 4 4  11 3 3  12 9 10  0  13 *PAN ID 5*  1  2 0 *PAN ID 6*   * Главный PAN-координатор 2   1   * PAN-координаторы   3 4   * Устройства |
| Рис. 5 Структура сети в виде кластерного дерева |

В данном случае большинство устройств являются устройства с полным набором функций(FFD), RFD присоединяются к сети как конечные устройства, т.к. они не позволяют связывать с ними другие RFD устройства. Любое же FFD устройство может функционировать как координатор и выполнять функцию синхронизатора для других устройств. Только одно устройство может быть главным PAN-координатором. Оно должно содержать большие вычислительные ресурсы, чем все другие устройства в сети. Главный PAN-координатор рассылает сигналы запроса соседним устройствам, формируя кластеры.



# Проблемы и ограничения

Так как сенсорные беспроводные сети имеют отличия от обычных сетей, то они также имеют собственные ограничения и проблемы [1]. Основные проблемы сенсорных беспроводных сетей представлены в CMAP-карте на рисунке 6.



Рис. 6 CMAP-карта проблем и ограничений в сенсорных беспроводных сетях Рассмотрим основные проблемы и ограничения более подробно.

**Энергопотребление.** Ограничение по энергопотреблению связанно с тем, что сенсоры работают от источника питания с ограниченным лимитом энергии(обычно батарейка). Чем реже они будут заменяться или заряжаться, тем более низкую стоимость будет иметь их обслуживание.

Также энергопотребление является важным ограничением при использовании сенсоров, доступ к которым осложнен, следовательно, источник питания не может быть заменен или подзаряжен. Например, научное наблюдение за сдвигом ледников, где требуется работа сенсоров в течение нескольких лет.

Требование на ограничение энергопотребления распространяется на сенсорный узел и на конструкцию сети. Например, выбор сделанный на физическом слое сенсорного узла влияет на энергопотребление всего устройства и конструкцию уровней, расположенных выше [3]. Потребление энергии процессоров, произведенных по CMOS технологии, главным образом зависит от энергии переключения и энергии утечки [4]:

где -емкость переключений при вычислительных операциях; - напряжение питания; - ток утечки, - время операции.

Энергия переключения ограничивает работу процессора по частоте. В наше время энергия переключения составляет более половины энергии работы процессора [5].

Также для уменьшения энергопотребления предусмотрено отключение передатчиков сенсорных узлов, когда нет необходимости передачи информации. На сетевом уровне обнаруживаются оптимальные пути передачи информации от сенсорного узла до базовой станции, учитывая число узлов, требуемую энергию и доступную энергию.

Кроме сетевого протокола на потребление энергии влияет конструкция узлов (например, маленький размер памяти, эффективность переключений между заданиями), программное обеспечение, механизмы защиты и даже рабочие приложения.

Самоуправление. Сенсорные сети часто должны работать в удаленных областях и в жестких условиях, без возможности их обслуживания и починки. Поэтому, сенсорные узлы должны конфигурироваться самостоятельно, взаимодействовать с другими узлами, адаптироваться к поломкам изменениям окружающей среды без вмешательства человека.

Самоуправление может быть представлено в нескольких формах:

* + - 1. Самоорганизация. Способность сети конфигурировать параметры системы. Например, сенсорное устройство может выбрать силу передачи данных, чтобы получить доступ к устройствам на бо льших расстояниях;
      2. Автоматическая оптимизация. Возможность устройств наблюдать имеющиеся ресурсы и оптимизировать их использование;
      3. Самозащита. Позволяет устройству распознавать и защищать себя от сторонних вторжений и атак;
      4. Возможность автоматического ремонта. Позволяет сенсорным узлам реагировать на изменения в сети и вносить изменения для их правильного функционирования

Беспроводное соединение. Выбор беспроводного соединения налагает ряд ограничений на конструкцию сенсорных сетей. Например, затухание сигнала ограничивает расстояние передачи информации. Связь между переданной и принятой информацией описывается законом обратных квадратов:

,

где - мощность принятого сигнала, - мощность переданного сигнала, – расстояние между приемником и передатчиком.

Следовательно, увеличение расстояния между сенсорным узлом и базовой станции приводит к увеличению мощности передаваемого сигнала. Поэтому более эффективно, с точки зрения затрат энергии, разделить большие расстояния на несколько маленьких.

Для меньшего энергопотребления можно использовать различные подходы. Например, устройства могут содержать два приемо-передающих устройств. Приемопередающее устройство с низким потреблением энергии используется для формирования сигналов включения узла. Или адаптивное управление данными[6], когда часть узлов остается включенными в определенное время.

Децентрализованное управление. Алгоритмы построения многих сенсорных сетей строятся по централизованному принципу. При децентрализованном управлении сенсорные узлы должны обмениваться информацией с соседними узлами, чтобы сгенерировать решении о коммутации узлов, без глобальной информации о всей сети. В следствии, децентрализованные алгоритмы могут быть не оптимальными, но более эффективные в отношении энергии, чем централизованные.

Например, при централизованном управлении базовая станция может опрашивать все сенсорные узлы, принимать от них информацию, сообщать каждому узлу свой маршрут передачи информации. При частом изменении сети потери будут значительны. Децентрализованный подход позволяет каждому узлу делать собственное решение при наличии небольшой информации (список соседних устройств, включающий информацию о расстоянии до базовой станции). В данном случае потери на управление будут уменьшены значительно.

Конструкция. В данное время возможности компьютерных систем продолжают быстро увеличиваться, однако главной целью беспроводных сенсорных сетей является создание маленьких, дешевых и эффективных устройств. Из-за требования к низкому потреблению энергии типичный сенсорный узел имеет небольшие скорости выполнения операций и объемы хранимой информации. Также из-за этого нежелательно использование некоторых устройств, таких как GPS приемники. Ограничения по размерам влияет на структуру протоколов и алгоритмов, реализованных в беспроводных сенсорных сетях. Например, таблица всех маршрутов в сети может быть слушком большой и не поместиться в памяти узла. Поэтому только небольшая часть информации (например, список соседних узлов) может храниться в памяти узла.

Таким образом, многие технические решения должны быть применены для работы на сильно ограниченном по параметрам оборудовании.

Безопасность. Удаленное расположение сенсоров и их автоматическая работа увеличивает их незащищенность к сторонним вторжениям и атакам. При беспроводном соединении достаточно легко для нарушителя перехватить пакеты, передаваемые сенсорным узлом. Например, наиболее большая угроза осуществления атаки «отказа в обслуживании» (*denial-of-service*), цель данной атаки нарушить корректное функционирование сенсорной сети. Это может быть достигнуто при помощи различных способов, например, при подаче мощного сигнала, который мешает сенсорным узлам обмениваться информацией («белый шум» или jamming attack) [1]. Есть различные варианты защиты систем от злоумышленников, но для многих из них необходимы высокие требования к аппаратным ресурсам, что труднодостижимо на жестко ограниченных по многим требованиям сенсорных узлах. Следовательно, сенсорные беспроводные сети требуют новых решений для создания ключей, их распространения, идентификации и защиты узлов.

# Заключение

Разработка и введение сенсорных сетей во все сферы жизни предоставит огромное количество преимуществ человечеству. Тематика сенсорных беспроводных сетей еще не достаточно изучена, имеются на данный момент ряд нерешенных проблем и ограничений, но преимущества привлекают компании для разработки стандартов передачи информации в сенсорных сетях, например, стандарт передачи данных ZigBee.

Данный вид сетей является интеллектуальным, то есть имеет возможность автоматического определения устройств и маршрутов их сообщения.

# Литература

1. Waltenegus Dargie, Christian Poelabauer «Fundamentals of Wireless Sensor Networks Theory and Practice» - Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing, 311c, 2010 John Wiley & Sons Ltd.
2. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Std 802.15.4™-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)
3. Shih, E., Bahl, P., and Sinclair, M. (2002) Wake-on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices. Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom).
4. Sinha, A., and Chandrakasan, A.P. (2000) Energy aware software. Proc. of the 13th International Conference on VLSI Design.
5. De, V., and Borkar, S. (1999) Technology and design challenges for low power and high performance. Proc. Of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED).
6. Ye,W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2004) Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 12 (3), 493–506.