

Сверхширокополосная беспроводная самоорганизующаяся прямохаотическая сенсорная сеть для мультимедийных приложений

А.С. Дмитриев, О.В. Евсеев, Е.В. Ефремова, В.А. Лазарев, М.И. Герасимов, А.И. Рыжов

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

Предлагается и исследуется беспроводная сенсорная сеть с приемопередатчиками, использующими в качестве носителя информации сверхширокополосные хаотические радиоимпульсы. Сеть характеризуется высокой физической скоростью обмена данными между сенсорными узлами, что позволяет использовать ее для мультимедийных приложений. Описывается структура сети, разработанные для сети приемопередатчики ППС-43, принципы энергосбережения в приемопередатчиках и в сети в целом. Рассматриваются алгоритмы самоконфигурации, самооптимизации и самовосстановления, организующие работу сети как сложной системы. Приводятся результаты моделирования сети и ее экспериментальной апробации.

We propose and investigate a wireless sensor network with transceivers, which use as carriers of information ultra wideband chaotic radio pulses. Network is characterized by a high rate of physical communication between the sensor nodes and can be used for multimedia applications. The structure of the network, network transceivers designed for PPS-43, the principles of energy conservation in the transceiver and the network as a whole are described. Algorithms for self-configuration, self-optimization and self-organizing the network as a complex system are considered. The results of network modeling and experimental validation are shown.

Введение

Беспроводные сенсорные сети применяются во многих областях: наука, медицина, вооруженные силы, транспортные системы и так далее. Как правило, сенсорные сети состоят из фиксированного числа сенсорных узлов, расположенных некоторым образом в пространстве и базовой станции (сервера, стока). Каждый сенсорный узел включает в себя один или несколько датчиков (сенсоров). Датчик может быть как достаточно простым устройством, осуществляющим сбор данных от внешней среды, так и достаточно сложной системой, осуществляющей наряду с получением информации, ее цифровую обработку. В «интеллектуальных» сенсорных сетях к этим функциям могут добавляться и другие, например, совместная обработка информации рядом узлов. Сенсорный узел включает в себя также приемопередающее устройство, которое может работать как передатчик, приемник и ретранслятор. Базовая станция имеет в своем составе приемопередатчики устройство обработки информации, например, персональный компьютер. Часто к сенсорным сетям предъявляется требование продолжительной работы в автономном режиме (до года и более) [1].

Ввиду ограничения на энергетические ресурсы и вычислительную мощность отдельного датчика, а также пропускную способность радиоканала, сенсорные сети, как правило, имеют дело с небольшими объемами обрабатываемых и пересылаемых данных. Типичными техническими средствами для создания таких сетей являются приемопередающие устройства реализующие стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) [2].

Однако возможны ситуации, когда для полноценного мониторинга среды необходимо иметь дело с относительно большими потоками информации. Примером такой ситуации может служить сенсорная сеть для сбора аудио или видео данных на некоторой территории, например, внутри здания. Беспроводные технологии передачи данных, используемые в сетях ZigBee малопригодны для этих целей из-за своей низкой пропускной способности. Другие популярные беспроводные технологии – WiFi и

Bluetooth, даже в своих последних спецификациях (WiFi direct, Bluetooth 3 и 4) также не предназначены для решения этих задач, в частности из-за большой потребляемой мощности и малого допустимого числа устройств.

В докладе предлагается, реализуется и исследуется сверхширокополосная сенсорная сеть с физической скоростью передачи данных между узлами до 6 Мбит/сек., использующая в качестве носителя информации хаотические радиопульсы [3-5]. Особое внимание уделяется алгоритмам организации сети, поддержанию ее в работоспособном состоянии при выходе отдельных сенсорных узлов из строя и энергосбережению.

Под организацией сети будем понимать процесс установления всех необходимых для ее работы связей между узлами сети. Под *самоконфигурацией* - запускаемый инициатором процесс автоматического поиска устройств, установления связей. Под *самооптимизацией* - прокладку маршрута от точки сбора информации до заданного сенсорного узла, оптимального с точки зрения некоторого критерия.

В связи возможным выходом из строя некоторых узлов или исчерпанием запаса энергии автономного источника питания, система должна иметь возможность построения альтернативных маршрутов обмена данными между сенсорами для сохранения целостности сети, состоящей из оставшихся работоспособных датчиков, т. е. обеспечивать *самовосстановление*.

Алгоритмы самоконфигурации, самооптимизации и самовосстановления являются ядром системы управления сети. Кроме того система управления обеспечивает побудку сети и осуществляет терминальные функции: осуществляет отображения процессов в сети на мониторе, обеспечивает оператору отправку различных команд и переводит сеть или ее часть в «глубоко спящий» режим с целью энергосбережения. Аппаратная часть системы управления включает в себя центральный компьютер (сервер, сток) и микроконтроллеры сенсорных узлов. Взаимодействие микроконтроллеров между собой и с сервером осуществляется по сверхширокополосным радиоканалам. Программная часть системы управления распределена между сервером и микроконтроллерами.

Структура сети

Рассматриваемая беспроводная СШП сенсорная сеть содержит от 10 до 50 приемопередающих узлов и сток. Каждый узел может собирать данные с помощью своего сенсора, осуществлять их первичную обработку и передавать другим узлам, находящимся в радиусе его действия. Узлы могут быть использованы также для приема данных от других узлов и передачи этих данных другим узлам, т.е. работать в режиме ретрансляции. Для каждого сенсорного узла, собирающего данные, может быть проложен маршрут, соединяющий его через узлы-ретрансляторы со стоком. Одновременно в сток могут поступать данные от одного или нескольких сенсорных узлов.

В отличие от приемопередатчиков на сенсорных узлах, приемопередатчик, входящий в состав стока имеет USB интерфейс, используемый для связи с компьютером. Дальность действия приемопередатчиков в свободном пространстве составляет 20-25 метров. Обмен информацией между приемопередатчиками осуществляется путем пересылки пакетов с данными. Пакеты формируются в микроконтроллере и представляют собой набор байт последовательно идущих друг за другом.

Вычислительное устройство стока управляет работой приёмопередатчика стока, отображает его текущее состояние, выдает команды на старт процессов самоконфигурации, самооптимизации и самовосстановления сети, осуществляет эти процессы после поступления соответствующей информации от сенсорных узлов,

принимает и обрабатывает данные от сети передатчиков, сохраняет или производит дополнительную обработку информации от сенсорных узлов.

Поскольку сеть предназначена для сбора, первичной обработки и доставки на сток мультимедийной информации, основной режим работы системы – непрерывная передача данных с достаточно высокой скоростью от нескольких сенсоров. Этот режим осуществляется с помощью синхронной работы сети и временного разделения потока сигналов, следующих по различным маршрутам.

Для обеспечения длительной автономной работы, в условиях жестких ограничений на емкость источников электропитания, в сети используется совокупность энергосберегающих мер, как для приемопередатчиков, так и для системы в целом.

Сверхширокополосные приемопередатчики

Для сетей рассматриваемого типа были разработаны, изготовлены и испытаны сверхширокополосные прямохаотичекие приемопередатчики ППС-43. Приёмопередатчик ППС-43 имеет характеристики, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики приёмопередатчика ППС-43.

	Характеристики
Полоса выходного сигнала	3...4,5 ГГц
Чувствительность приемника	-70 дБм
Физическая скорость передачи/приёма данных	6 Мбит/с
Мощность излучения в импульсе	13 дБм
Максимальная дальность связи	30 м
Интерфейс	UART
Напряжение питания	4,5 В

При работе сенсорной сети требуется длительное функционирование СШП-приёмопередатчика без замены источников питания. Поэтому при разработке узлов было уделено большое внимание энергосбережению, в частности спящим режимам. Для обеспечения максимального энергосбережения разработанный приёмопередатчик в зависимости от стадии решаемой задачи может функционировать в следующих режимах:

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

В спящем режиме приёмопередатчик потребляет примерно в 100 раз меньше, чем в режиме активной работы. В режиме глубокого сна он потребляет мощность примерно в 20 раз меньше чем в спящем режиме, однако для выхода из этого режима требуется более длительное время, чем для выхода из спящего режима. Поэтому глубокий спящий режим может быть использован, когда устройство редко включается в активный режим.

Приёмопередатчик ППС-43 может работать в составе беспроводной сенсорной сети по схеме со статической маршрутизацией или с использованием алгоритмов самоконфигурации и самооптимизации.

Управление сетью

При разработке алгоритмов управления сетью основной упор делался на простоту реализации, гарантированное обнаружение всех узлов сети и на минимизацию

энергопотребления. В качестве прототипа были взяты алгоритмы инициализации и прокладки маршрутов, предложенные в работе [6]. Простота реализации достигается посредством того, что основная масса вычислений и обработки данных осуществляется на вычислительном устройстве стока. Гарантированное обнаружение всех узлов сети обеспечивается за счет отсутствия коллизий в радиоканале: в каждый момент времени радиоэфир занимает не более чем одно устройство. Для этого используется разделение ресурсов беспроводной среды передачи по времени: временная ось делится на равные промежутки времени – “слоты”. За каждым приемопередатчиком закрепляется свой слот, в течение которого он может передавать информацию в эфир. Другими словами, каждый приемопередатчик “знает” когда эфир пуст, и он может излучать данные. Тем самым удается избегать коллизий: на один приемник никогда не придут сразу несколько пакетов с данными от различных источников. Для того чтобы сеть потребляла минимум энергии в приемопередатчиках предусмотрены механизмы энергосбережения.

Управление сетью включает в себя следующие операции:

- 1) пробудку приемопередатчиков из состояния глубокого сна;
- 2) обнаружение приемопередатчиков
- 3) установление возможных связей между ними;
- 4) вычисление маршрута до выбранного узла сети;
- 5) прокладку маршрута к выбранному узлу сети;
- 6) съем данных назначенными сенсорными узлами;
- 7) доставка данных от сенсорных узлов к стоку и их обработка;
- 8) перевод, не используемых в данный момент времени, приемопередатчиков в состояние глубокого сна.

Взаимодействие между узлами сети осуществляется посредством посылки в эфир пакетов, содержащих в себе в общем случае команды, ответы на команды и данные.

Пусть, имеется какое-то число приёмопередатчиков, расположенных некоторым образом в пространстве и сток. Все приемопередатчики, кроме приемопередатчика стока, первоначально находятся в режиме глубокого сна. Данный режим характеризуется минимальным энергопотреблением и отсутствием возможности принимать или передавать данные по эфиру. Для того чтобы иметь возможность получать команды извне устройства периодически просыпаются на короткий промежуток времени и прослушивают эфир, а затем снова засыпают.

Допустим нам нужно получить данные с определенного сенсорного узла. Сток начинает процесс пробудки всех устройств, находящихся в пределах его радиовидимости, путем непрерывной посылки пробудочных пакетов WAKE_UP в течении определенного промежутка времени. Приняв хотя бы один такой пакет, приемопередатчик выходит из фазы глубокого сна и входит в режим непрерывного прослушивания радиоэфира. После пробудки всех устройств в зоне радиовидимости, сток посылает в эфир широковещательный пакет типа NREQ. По сути, этот пакет является “приглашением” к присоединению приемопередатчика к сети. Устройства, получившие пакет, отвечают на него в свои временные слоты пакетами типа NREP. После посылки специального широковещательного пакета приемопередатчик стока какое-то время находится в состоянии приема данных из эфира, а после этого передает на вычислительное устройство стока информацию об ответивших соседях. Таким образом, формируется первый круг устройств, присоединившихся к сети.

Затем сток по очереди посылает специальные пакеты (RNREQ) каждому ответившему узлу первого круга. Получив данный пакет, каждый узел первого круга, в свою очередь, начинает процесс пробудки и обнаружения своих соседей. Получая пакеты типа NREP, узлы первого круга создают и хранят у себя в памяти таблицу с

номера соседних ответивших устройств. По окончании времени ожидания вся информация об обнаруженных соседях передается на сток и на ее основе формируется второй круг сети. Далее по аналогии следует формирование оставшихся кругов сети. В результате обнаруживаются все узлы сети (инициализация сети) и устанавливаются связи между ними.

По окончании инициализации сток определяет систему возможных связей между устройствами в сети.

Следующим шагом является поиск оптимального маршрута до тех сенсорных узлов, с которых необходимо принимать данные. На основе полученных на предыдущем шаге данных, программа определяет все возможные пути к нужным узлам сети и выбирает маршрут с наименьшим числом ретрансляций.

Экспериментальное исследование сети

Для подтверждения технической реализуемости предлагаемых алгоритмов были проведены экспериментальные исследования с использованием СШП прямохаотических приёмопередатчиков ППС-43 в составе сенсорных узлов и приемопередатчика ППС-42 [7] в составе стока.

Для проведения экспериментов все устройства были запрограммированы и настроены соответствующим образом. Всего в экспериментах использовалось 10 сенсорных узлов и сток. Было произведено несколько серий экспериментов, которые можно разделить на три группы. В конце каждой серии сенсорная сеть переводилась в режим глубокого сна по команде со стока или по истечению определенного периода времени бездействия.

В первой группе экспериментов основное внимание уделялось инициализации сети: побудка, обнаружение приемопередатчиков и связей между ними. Радиус действия устройств был снижен за счет выбора порога срабатывания приемника с 30 до 2-3 м, чтобы обеспечить возможность работы с несколькими кругами устройств, присоединенных к сети.

Во второй группе экспериментов проверялась работа алгоритма по выбору оптимального маршрута (самооптимизация) до заданного узла сети.

Далее необходимо было убедиться, что при выходе из строя одного из ретрансляторов или нарушении связи между ретрансляторами алгоритм находит альтернативный путь к тому же узлу сети. Для этого в процессе передачи данных между двумя ретрансляторами ставили препятствие, через которое радиосигнал не проходил. В результате данные с соответствующего сенсорного узла переставала поступать в сток. Чтобы найти альтернативный маршрут системе управления требуется произвести повторную инициализацию сети. Эксперименты показали, что альтернативный маршрут успешно определяется и включается в процесс передачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» Гос. контракт № 11.519.11.4027, Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Современные проблемы радиофизики», а также гранта РФФИ № 12-07-33106 мол_а_вед.

Литература

1. *Krishnamachari B.* Networking Wireless Sensors // Cambridge University Press, 2005.
2. IEEE P802.15.4 Wireless Personal Area Networks. 2005.
3. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. и др.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ, 2001, т. 46, № 2, с. 224–233.

4. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. и др.* Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов. Патент РФ № 2185032, приоритет от 27.07.2000 г.
5. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В.Ю.* Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1278–1289.
6. *Юркин В.Ю., Мохсени Т.И.* Детерминированный и вероятностный иерархические подходы к самоорганизации в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях на основе хаотических радиоимпульсов // труды IV Всероссийской конференции “Радиолокация и радиосвязь”, Москва, Россия, с.452-456.
7. *Лазарев В.А.* Прямохаотический сверхширокополосный приемопередатчик для мультисканальных систем связи и интеллектуальных сенсорных сетей. // Нелинейный мир. 2011. №1, с. 52-53.