

СЕТИ СВЯЗИ

УДК 621.396.99

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ — ПЕРСПЕКТИВЫ И ЗАДАЧИ*

А.А. Зайцев, доцент Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), к.т.н.

Е.А. Устинова, младший научный сотрудник РГРТУ, tor@rgрта.ryazan.ru

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, датчик, стандарт IEEE 1451, модель OSI, распределенная обработка, маршрутизация.

Введение. Современные достижения в построении микро-электромеханических систем (MEMS micro-electro-mechanical systems), в области беспроводной связи и микропроцессорной техники привели к появлению миниатюрных, малопотребляющих устройств, которые включают микро-сенсор, оснащенный устройством цифровой обработки сигналов (ЦОС) и беспроводным приемопередатчиком. Такие устройства могут быть объединены в сеть с несколькими тысячами узлов. Подобные сети широко применяются в подводной акустике, полевых военных системах наблюдения, в устройствах электронной борьбы, в геофизике, при сейсмическом удаленном наблюдении, мониторинге окружающей среды, в биомедицинских системах и т.д.

Эти сети получили название беспроводных сенсорных сетей (БСС) от англ. WSN — wireless sensors network. БСС конструируются для выполнения таких задач, как обнаружение, классификация, локация (определение местоположения) и сопровождение одного или нескольких объектов. Обычно модули БСС (моты — от англ. «mote» — пылинка) имеют ограниченный запас энергии, малую мощность передатчика и недоступны для обслуживания (или это обслуживание нецелесообразно). Перспективность данного направления может базироваться на предположении, что в ближайшем будущем БСС, используемые для решения самых разных задач (от военной до бытовой сферы), станут привычнее, чем сегодня телевизионное вещание и телефонная связь [1].

Данное научно-техническое направление активно развивается. Стремительное развитие средств электроники и телекоммуникаций требует основательного подхода к решению огромного спектра задач, связанных с построением и эффективным применением БСС. Рассмотрим задачи, которые стоят перед инженерами, желающими реализовать и развить данную технологию.

Типовая структура БСС и функциональная схема мота (рис.1). Датчик (обычно пассивный, т.е. не потребляющий энергии) служит источником сигнала, отражающего состояние исследуемого феномена. Очевидно, что такой сигнал должен быть переведен в цифровую форму, а затем обработан для последующей передачи. В качестве обработки может выступать как простое форматирование, так и анализ с целью

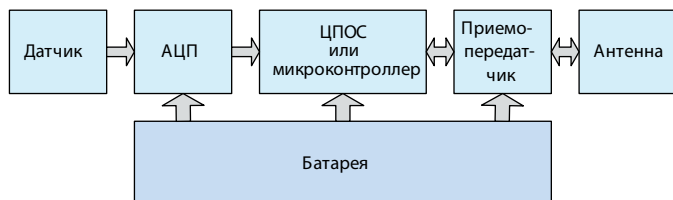


Рис. 1

выделения необходимой информации или сжатия. Приемопередатчик необходим не только для передачи собственной информации и приема команд управления, но и для ретрансляции пакетов других мотов.

Батарея — критический узел мота. Обычно ее размер и вес являются определяющими в формировании форм-фактора устройства, а емкость — главный фактор, влияющий на «время жизни» мота. Иногда БСС предназначена не только для сбора информации, но и для воздействия на внешнюю среду. В этом случае кроме/вместо датчика может использоваться исполнительное устройство. Поэтому обобщенная схема мота должна включать преобразователь (transducer) вместо датчика и аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Главное преимущество БСС — большое число узлов, покрывающих контролируемую область с определенной степенью равномерности. Это позволяет передавать информацию от одного узла к другому, что экономит энергию. В большин-

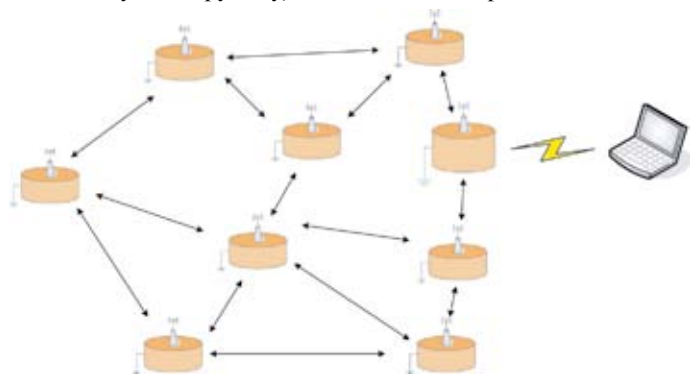


Рис. 2

стве случаев БСС представляет собой многоячеистую сеть, имеющую один узел сбора данных и управления (рис. 2). Основные отличительные признаки БСС:

- узлы обладают малой активностью или, другими словами, малым трафиком в сети;
- узлы сети расположены очень плотно, и каждый узел имеет, как правило, более двух доступных по радиоканалу соседей;
- узлы имеют «предрасположенность» к выходу из строя, т.е. пропадание узлов вследствие их повреждения или истощения батареи является штатным событием работы сети;
- топология сети подвержена изменениям и не всегда может быть определена заранее;
- узлы обычно используют широкополосную стратегию при передаче данных (ПД) и могут не иметь никакого идентификатора или сетевого адреса.

Классификация актуальных задач непременно должна содержать вопросы, связанные с построением аппаратной части мота, телекоммуникационные проблемы и задачи прикладного характера. Рассмотрим их подробнее.

Аппаратная часть. Первый класс задач относится к аппаратной части мота. Разработка новых малопотребляющих микропроцессорных устройств, миниатюрных высокочувствительных приемопередатчиков, пассивных высокочувстви-

* Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям. Госконтракт №02.740.0002.

тельных датчиков и приводов, повышение емкости и КПД батарей при расширении рабочего температурного диапазона и снижении массы — все это актуально для БСС, как ни для какой другой технологии. Интегральный критерий, оценивающий аппаратную часть мота, должен включать общий объем мота, вес, стоимость и время «жизни», т.е. бесперебойной работы при заданном протоколе работы сети. При этом стоимость является одним из важнейших показателей, так как обычно предполагается применение большого (> 1000) числа мотов, а в большинстве приложений не подразумевается повторное использование этих устройств.

Условия, при которых такие устройства должны эффективно функционировать, определяются прикладной задачей и могут быть самыми жесткими: большое давление, высокая или низкая температура, вибрация, значительный уровень радиопомех.

Основным элементом, отличающим БСС от других сетей, является преобразователь — датчик или исполнительный механизм. На данный момент существует множество различных технически реализуемых схем преобразования различных физических величин в сигнал, который может быть измерен для последующего анализа. Температурные, акустические, сейсмические датчики, датчики давления, влажности химического состава, ориентации, ускорения, устройства управления двигателями, электромеханическими реле и клапанами, излучателями — этот список можно долго продолжать, а область техники, занимающаяся их разработкой и использованием, едва ли не самая большая в современном мире. Широкий спектр различных вариантов реализации этих устройств с одной стороны дает большую свободу при разработке мотов, а с другой требует каждый раз заново решать проблему конструктивного исполнения мота и интерфейса с процессорной или передающей частью [2].

Одной из централизованных попыток решить эту проблему стал стандарт IEEE 1451 «Standard for smart transducer interface for sensors and actuators». Объектная модель интеллектуального преобразователя, независимая от структуры сети и протокола ПД, описана в разделе IEEE 1451.1 данного стандарта. Она позволяет производителям выпускать преобразователи для различных сетевых решений. IEEE 1451.2 представляет собой электрическую спецификацию преобразователей и допускает передачу описания подключаемого преобразователя, вводя технологию Plug-and-Play в область БСС. IEEE 1451.3 и IEEE 1451.4 призваны решать проблемы высокоскоростных приложений. Можно сказать, что стандарт IEEE 1451 стал логическим расширением стандарта IEEE 488 «General purpose interface bus», но относящимся не к инструментам в широком смысле этого понятия, а к датчикам (рис. 3).

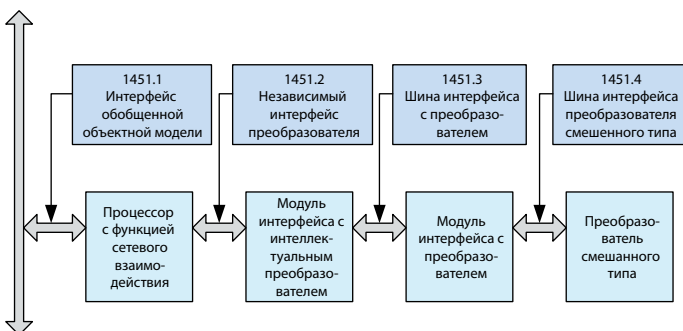


Рис. 3

Использование этого стандарта позволяет строить БСС по очень сложной, на первый взгляд, но очень универсальной схеме (рис. 4). Конечно, цепочку «сенсор—сеть» можно реализовать и по более привычной схеме (рис.5).

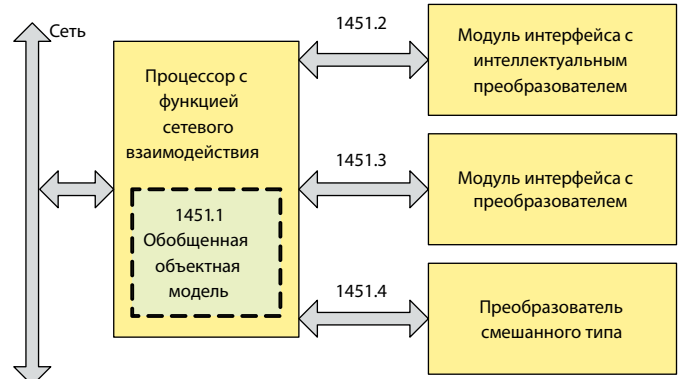


Рис. 4

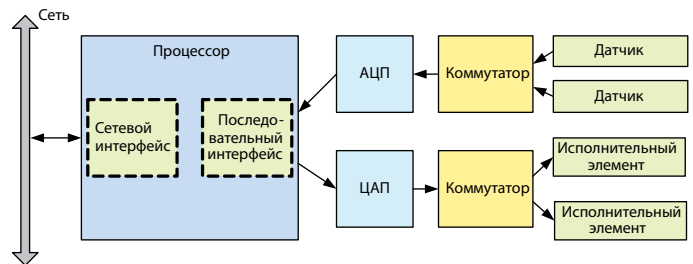


Рис. 5

Особого внимания заслуживают MEMS-технологии. Микро-электромеханические устройства представляют собой интеграцию механических, электронных, сенсорных и исполнительных устройств на общей кремниевой основе, выполненную путем микросборки. Крошечные устройства могут быть наделены значительной функциональностью: получение информации, обработка и выполнение механических действий. Наиболее распространена данная технология при построении акселерометров — микродатчиков, измеряющих ускорение. Дальнейшее развитие MEMS-технологий должно позволить значительно снизить вес и стоимость мотов.

Эффективное использование энергетического ресурса и, как следствие, продление времени работы мота и сети в целом, на аппаратном уровне решается, в основном, за счет применения микросхем — менеджеров питания, управления напряжением питания процессора, оптимального выбора самого процессора и работы процессора под управлением специальной примитивной операционной системы, управляющей переходами процессора и мота из состояния функционирования в состояние сна и обратно.

Напомним, что энергопотребление компонентов, выполненных по КМОП-технологии, можно разделить на две части: первая соответствует активному режиму работы, т.е. переключению транзисторных ключей и т.п.: вторая — это токи утечки, составляющие незначительный процент от токов в активном режиме. Однако с ростом плотности интеграции современной элементной базы и допустимой максимальной тактовой частоты цифровых устройств доля токов утечки в общем объеме расходуемой мощности увеличивается.

Поскольку с точки зрения эффективной работы мота, большую часть времени (до 99%) он должен находиться в неактивном режиме, следует отключать питание неиспользуемых микросхем и узлов. Это позволит сократить потери из-за токов утечки. Кроме того, некоторые процессоры позволяют снижать напряжение питания, что приводит к снижению энергопотребления и уменьшению тактовой частоты работы устройства. Это соответственно сказывается на быстродействии процессора, но в некоторых приложениях допустимо.

Встает задача построения алгоритма динамического управления напряжением питания, который бы позволил

максимально снизить энергетические затраты и обеспечить требуемый уровень производительности и предельные значения задержек реакции мота. Прикладные задачи, возникающие в произвольные моменты времени и в общем случае требующие различных вычислительных затрат, выполняются процессором с управляемыми напряжением питания и частотой работы ядра.

Монитор загрузки (рис. 6) на основе косвенной информации о работе процессора w формирует решение о необходимом режиме работы процессора r , на основе которого подается требуемое напряжение питания $V(r)$ и задается тактовая частота $f(r)$. Основная трудность на этом пути — сложность предсказания загрузки процессора.

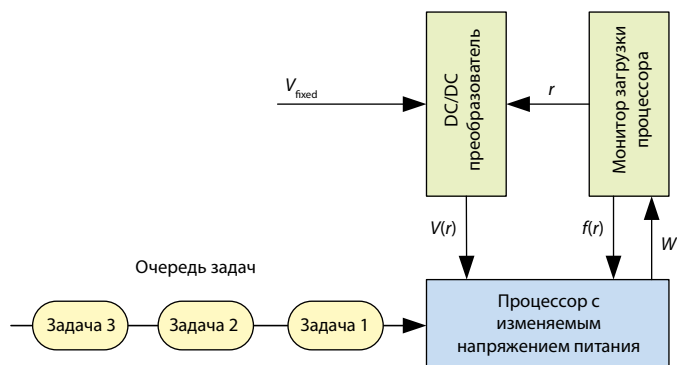


Рис. 6

Если целесообразность цифровой операционной части сейчас не вызывает сомнения, то другие компоненты мота могут/должны быть выполнены в аналоговом исполнении. Несомненный факт, что цифровая часть оборудования неизбежно уменьшает свой вклад в стоимость мота и его массогабаритные параметры. В то же время некоторые аналоговые компоненты по чисто физическим причинам не могут быть уменьшены в размерах, а стоимость их либо не меняется, либо растет с постепенным уменьшением номенклатуры выпускаемой аналоговой элементной базы ведущих производителей электроники.

Одной из габаритных микросхем во многих приемопередатчиках является канальный фильтр приемника. Его большие размеры обычно определяются наличием конденсаторов большой емкости, которые, в свою очередь, необходимы для обеспечения высокого динамического диапазона. Даже если канальный фильтр реализуется в цифровой форме, сам АЦП должен содержать фильтр, исключающий наложения сигнала при дискретизации. Можно говорить об обратной пропорциональной зависимости между размером канального фильтра и переходной зоной фильтра. Кроме того, требования к параметрам частотной избирательности такого фильтра также должны быть ослаблены с целью минимизации его размеров и стоимости [3].

Особое внимание при проектировании мотов уделяют источникам электропитания. В связи с тем, что узел БСС должен потреблять предельно малую мощность (50 мкВт и ниже), эффективными могут показаться такие альтернативные источники энергии как солнечные элементы, преобразователи вибрации и даже фонового радиоизлучения в ток. Однако эти источники до сих пор достаточно дороги, а их использование требует обязательного наличия соответствующих свойств внешней среды. Наиболее надежным источником электрической энергии до сих пор остаются электрические аккумуляторы и батареи.

На данный момент существует большое количество альтернативных технологий исполнения элементов питания. Всегда можно выбрать подходящий для данного приложения

тип батарей. Однако при разработке протоколов физического уровня следует учитывать преимущества критического режима работы батарей, который не зависит от технологии изготовления. Теоретически и экспериментально для большинства типов батарей доказано, что при разрядке батареи короткими импульсами, заряд, который удастся получить, больше заряда при равномерном постоянном разряде батареи. И чем короче импульсы разряда, тем эффективней может быть использована запасенная энергия, т.е. существует эффект восстановления заряда при импульсной разрядке.

Телекоммуникационные задачи. Второй класс задач относится к телекоммуникационным функциям мота. Здесь следует выделить несколько подзадач, соответствующих уровням реализации взаимодействия. Модель OSI-7 применительно к сенсорным сетям претерпела некоторые изменения (рис. 7).

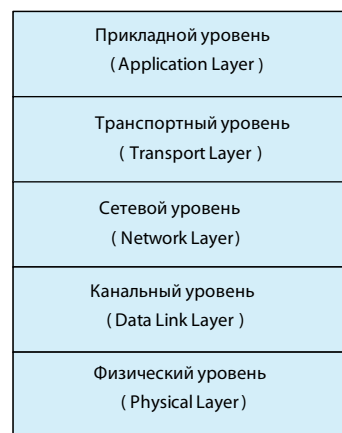


Рис. 7

В соответствии с этой моделью выделяют три подкласса задач. Первый, соответствующий физическому уровню, состоит в поиске видов модуляции с высокой энергетической эффективностью, а также способов снижения потерь из-за неидеальности характеристик приемопередатчика. Для организации ПД могут применяться электромагнитные волны радио, инфракрасного и видимого диапазонов. При использовании радиоволн главным ограничением является разрешенный (не лицензируемый) диапазон частот. Взаимодействие в инфракрасном диапазоне не подвержено влиянию электромагнитных помех от других устройств и не требует лицензирования, однако оно возможно только при обеспечении линии прямой видимости между мотами. Существуют схемы взаимодействия в оптическом диапазоне, использующие угловые отражатели на основе микрзеркал и MEMS-устройств.

Второй подкласс телекоммуникационных задач в БСС заключается в поиске эффективных методов доступа к каналу, включая поиск оптимального соотношения между эффективностью методов повышения достоверности передачи и энергетическими затратами на реализацию данных методов. Действительно, ограниченный частотный ресурс и высокая плотность узлов сети требуют применения эффективного механизма доступа к каналу и решения таких общеизвестных проблем как «скрытый» и «засвеченный» терминал. Поскольку приемник тоже тратит значительную мощность, постоянное прослушивание канала — самое «невыгодное» решение. Тяжелые условия эксплуатации БСС, в особенности при мониторинге промышленных объектов, требуют введения помехоустойчивого кодирования. При этом компромисс между обеспечиваемой достоверностью передачи и необходимой избыточностью становится серьезной проблемой.

Третий подкласс задач, согласно модифицированной структуре OSI, включает методы маршрутизации в самом широком смысле этого понятия [4].

Выбор алгоритма маршрутизации — один из самых сложных вопросов, решаемых при проектировании сенсорной сети. Во-первых, маршрутизация требует координации работы всех узлов сети. Во-вторых, алгоритм маршрутизации должен справляться с выходами из строя узлов путем перенаправления трафика и обновления баз данных. В-третьих, для достижения наилучших результатов алгоритм маршрутизации должен иметь возможность изменять маршруты при перегрузке некоторых областей сети. Применяется много алгоритмов маршрутизации, различающихся степенью сложности и эффективности. Это объясняется отчасти историческими причинами, а отчасти — разнообразием предназначений различных сетей [5].

Существуют несколько способов классификации алгоритмов маршрутизации. Один из них состоит в разделении всех алгоритмов на централизованные и распределенные. В централизованных алгоритмах выбор всех маршрутов происходит в централизованном узле, а в распределенных — в узлах сети. При этом, если необходимо, узлы обмениваются информацией.

Согласно другой классификации, методы маршрутизации в БСС делятся на: равномерные, иерархические и основанные на географическом местоположении устройств. Это — классификация в зависимости от структуры сети. В равномерных методах все устройства выполняют одинаковые функции, в иерархических — задачи разделяются между устройствами.

Иерархическая (еще ее называют кластерная) маршрутизация первоначально была разработана для проводных сетей. Преимущества подобных алгоритмов заключаются в эффективности соединений и возможности изменения количества устройств в сети. В таких алгоритмах, как правило, более мощные устройства используются для обработки, а менее мощные только для проведения измерений и передачи результатов. Это означает, что разбиение области на кластеры и отведение каждому кластеру своей роли приводит к значительному увеличению времени жизни, возможности изменения количества устройств в сети и уменьшению энергетических затрат. Последнего удается достичь за счет того, что данные обрабатываются в главном устройстве кластера, что приводит к снижению общего объема передаваемой информации.

Третий вид маршрутизации основан на географическом расположении устройств. Расстояние между соседними мотами, как правило, измеряется на основе мощности входного сигнала. Относительные координаты устройств могут быть получены путем обмена служебной информацией между соседними элементами сети. Координаты могут быть определены устройствами самостоятельно с помощью системы GPS (GPS — Global Positioning System), если устройства оборудованы малогабаритными малопотребляющими приемниками GPS.

Существует еще одна классификация, при которой алгоритмы разделяются на три категории: активные, реактивные и гибридные. В активных (статических) протоколах все направления связи вычислены прежде, чем они действительно будут необходимы, они фиксированы и не зависят от колебаний трафика. Маршрут в таком алгоритме меняется только в случае выхода из строя какого-либо узла. Это позволяет избежать задержек, поскольку не требуется поиска маршрута до узла назначения в момент установки связи. Главный недостаток активных протоколов — значительный объем служебного трафика, необходимого для хранения и поддержания актуаль-

ности маршрутных таблиц. Кроме того, такой подход плохо работает, если топология сети меняется чаще, чем на узлах обновляется информация о топологии. В этом случае таблицы кратчайших маршрутов будут быстро устаревать, а маршруты в ней становятся некорректными. Такой способ маршрутизации рекомендуется применять либо для очень простых сетей, либо когда эффективность работы сети не существенна.

В реактивных протоколах маршрут до конкретного узла ищется только в том случае, если связь с данным узлом действительно необходима (по требованию). Недостатки таких протоколов — большее потребление энергии, задержки при установке связи между узлами, а также то, что в случае поиска маршрута большим числом сенсоров служебный трафик может превышать пользовательский.

Гибридные протоколы используют комбинацию этих двух методов, объединяя их достоинства. Таблица маршрутизации заполняется некоторыми заранее известными маршрутами, а затем дополняется при появлении новых активных узлов сети. Когда датчики стационарны, то предпочтительнее иметь таблицу маршрутов вместо того, чтобы пользоваться реактивными протоколами. Выигрыш от использования этого протокола зависит от количества активизированных узлов, что является недостатком, так как ограничивает применение данного протокола.

Еще один класс алгоритмов — это так называемые адаптивные алгоритмы. При их использовании для регулировки параметров взаимодействия и уровней энергии некоторые параметры сети могут изменяться. Такие протоколы могут быть получены на основе: согласования информации, с множеством путей или исходя из уровня шума в канале связи.

Обобщенная классификация алгоритмов маршрутизации представлена на рис. 8.



Рис. 8

Следует отметить, что этот круг задач является самым популярным, поскольку такие задачи для систем связи и распределенной обработки данных стоят перед учеными и инженерами уже давно. Успешное применение полученных результатов и алгоритмов для обычных телекоммуникационных сетей вселяет оптимизм. Однако БСС имеют свою специфику. Например, плотность расположения узлов БСС на порядки выше. Кроме того, для БСС акцент смещается от достоверности передачи в сторону энергетической эффективности. Даже небольшая вероятность необходимости повторной пересылки информации может быть недопустимой роскошью. Если учесть, что во многих приложениях структура сети заранее неизвестна и может в значительной степени меняться в течение периода «жизни» сети, то можно констатировать необходимость самых серьезных исследований в данной области.

Распределенная обработка в БСС. Третий класс задач относится к вопросам обработки данных. Современные цифровые устройства обладают достаточно низким удельным потреблением мощности, приходящейся на 1 млн операций. В связи с этим становится актуальным вопрос о предварительной обработке данных перед ее передачей. Действительно, современные ЦПОС обладают вычислительной мощностью, сравнимой со вчерашним персональными ЭВМ. Если учесть, что сеть состоит из большого числа мотов, то практически имеем огромную распределенную вычислительную систему, ресурсы которой можно направить на предобработку данных для повышения эффективности работы всей системы [6]. Про большинство методов обработки можно сказать, что они на основе данных большего объема выделяют полезную информацию, представляя ее в меньшем объеме данных. Самый яркий пример предобработки — сжатие данных.

Рассмотрим простой пример. Имеем типовую микросхему приемопередатчика с чувствительностью приемника в -92 дБ, мощностью передатчика $3,6$ дБм. Условие распространения — свободное пространство в пределах прямой видимости.

Можно показать, что при заданной чувствительности приемника $S = 25,12$ нВт мощность передатчика должна достигать значения

$$P_{\text{вых}} = SL_{\text{los}},$$

где $L_{\text{los}} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2}$ — потери в свободном пространстве (при условии прямой видимости los).

Длина волны для частоты 868 МГц:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{868 \cdot 10^6} = 0,3456 \text{ м.}$$

В результате получим:

$$P_{\text{вых}} = 2,512 \cdot 10^{-5} L_{\text{los}} = 0,03346 R^2 \text{ мВт.}$$

Энергия, требуемая для передачи одного бита, для сенсоров с адаптивно изменяющейся мощностью:

$$E_s = 0,03346 R^2 T \text{ Дж.}$$

Для частоты 868 МГц стандартом IEEE 802.15.4 используется скорость 20 кбит/с, т. е. время передачи одного бита составляет 50 мкс. Таким образом, получаем выражение для энергии:

$$E_s = 0,03346 R^2 T|_{T=50\mu\text{с}} = 0,03346 \cdot 50 R^2 = 1,673 \cdot 10^{-6} R^2 \text{ мДж.}$$

Пусть $R = 50$ м. Тогда для передачи одного бита на расстоянии 50 м требуется

$$E_s = 4,1825 \text{ мкДж,}$$

а для передачи пакета в 1000 бит

$$E_{s1000} = 4,1825 \text{ мДж.}$$

Рассмотрим случай, когда часть информации обрабатывается самим устройством и ведется передача уже обработанных данных. Для предобработки данных воспользуемся быстрым преобразованием Фурье (БПФ) на 1024 точки. Применение БПФ, как известно, позволяет снизить общее количество требуемых вычислений до $N \log_2 N$ и для 1024 необходимо

$$N_{\text{БПФ}} = N \log_2 N = 1024 \log_2 1024 = 10240 \text{ операций.}$$

Пусть коэффициент сжатия $K = 1,55$ раз. Такое значение K позволяет уменьшить объем данных без потери качества передачи.

Предположим, что для сжатия процессору требуется совершить 2^* (количество точек БПФ) операций, а именно 2048 . В этом случае передавать нужно в K раз меньше данных, т. е. вместо исходного пакета данных в 1000 бит теперь необходимо передать

$$N_{\text{код}} = \frac{1000}{K} = 645 \text{ бит.}$$

Определим количество энергии, затрачиваемое на обработку данных, т. е. сжатие. В качестве примера рассмотрим микропроцессор Blackfin ADSP-BF533 с частотой работы 300 МГц, потребляемой мощностью 644 мВт.

В соответствии с этими параметрами можно определить энергию, потребляемую процессором при выполнении одной операции: $E_p = 2,14$ нДж.

Общее число операций, требуемое для обработки данных:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{БПФ}} + 2048 = 10240 + 2048 = 12288.$$

Тогда, суммарная энергия, затрачиваемая процессором для выполнения N_{Σ} операций:

$$E = 2,14 \cdot 10^{-9} \cdot 12288 = 2,6296 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} = 26,296 \text{ мкДж.}$$

Общая энергия в этом случае будет представлять собой сумму энергий на обработку данных и передачу:

$$E_{\Sigma} = 4,1825 \cdot 10^{-6} \cdot 645 + 26,296 \cdot 10^{-6} = 2,7 \text{ мДж.}$$

Таким образом, если сравнить энергию, потребляемую при непосредственной передаче пакета из 1000 бит, и энергию, затрачиваемую для предварительной обработки с помощью БПФ на 1024 точки, сжатия с коэффициентом $K = 1,55$ и последующей передаче, можно сделать вывод, что второй случай дает выигрыш в энергии на передачу в $1,5$ раза. Это позволяет судить об эффективности применения частичной обработки данных самими устройствами БСС.

Распределенная предобработка данных в БСС является пока самым неисследованным вопросом. Отметим, что следует разделять обработку данных, соответствующую прикладному уровню и глобальной цели сети, и предобработку, направленную на подготовку сырых данных к последующей передаче и для централизованного накопления. Очень интересен вопрос о синтезе алгоритмов маршрутизации и алгоритмов распределенной обработки данных [7].

Прикладные задачи. Четвертый класс задач — прикладной. Существует масса областей науки, техники и народного хозяйства, где применение БСС имеет перспективу. С точки зрения прикладных алгоритмов, решаемых БСС, можно выделить следующие подзадачи. *Сбор данных* — самое востребованное применение БСС. В случае, если темп сбора информации невелик, то задача сводится к эффективному решению задачи маршрутизации. Если темп сбора информации достаточно велик (составляет проценты и более от пропускной способности сети), но количество активных (регистрирующих) мотов не велико, т. е. несколько процентов от общего числа, то возникает задача эффективного сжатия, агрегирования и перераспределения ресурсов между регистрирующими и не активными мотами.

Особой прикладной задачей является *слежение за движущимся в зоне действия сети объектом*. Обычно физическими сигналами являются сейсмические или акустические волны, поражаемые объектом. Анализируя амплитуду и фазу

регистрируемых сенсорами сигналов, можно в общем случае получить координаты объекта. Существуют подходы к решению данной задачи, которые подразумевают формирование решения внутри сети на основе внутрисетевого взаимодействия и обмена. Такая сеть не нуждается в центральном управляющем и анализирующем модуле. Сформированная информация может быть распространена по сети и передана исполнительным устройствам.

Одной из важных задач совместной обработки является локация источника сигнала с помощью сети пассивных стационарных сенсоров. Целью в этом случае является определение позиции движущегося в зоне контроля объекта. Большинство методов локализации базируются на измерении одного из трех физических параметров, получаемых с сенсоров: времени запаздывания (TDOA — time delay of arrival), направления, с которого регистрируется сигнал (DOA direction of arrival), и мощности принятого сигнала. DOA может быть оценено по разности фаз сигналов, принятых различными сенсорами.

Однако данный метод применим в случае узкополосных когерентных источников сигналов. Кроме того, необходима дорогая антенная решетка на каждом узле. Метод TDOA используется для широкополосных сигналов, однако требует высокой точности измерения или оценки временных интервалов. Определение местоположения по измерению мощности сигнала на каждом сенсоре значительно проще и дешевле.

Вспомогательные задачи. Пятый класс задач носит утилитарный характер. Эти задачи не могут быть отнесены к какому-либо одному классу из перечисленных выше, но охватывают несколько из них. При этом используемые алгоритмы предназначены для увеличения знаний сети о самой себе. Рассмотрим некоторые из задач.

Определение координат расположения мотов в сети. Следует указать, что установка мотов может иметь детерминированный порядок (характерно для малых сетей) или каждый мот может иметь случайные координаты (когда сеть состоит из сотен и даже тысяч мотов). Решение задачи определения координат может быть найдено: на аппаратном уровне за счет интеграции в мот GPS приемника, на уровне сетевого взаимодействия путем анализа таблиц смежности, или на прикладном уровне с помощью анализа амплитуд зарегистрированных сигналов. Таким образом, БСС может обладать свойством самоорганизации.

Другой утилитарной функцией является *синхронизация мотов* при отсутствии GPS приемников у каждого мота. Действительно, в случае когда несколько мотов регистрируют и передают цифровые сигналы, обладающие высокой корреляцией между собой, самым эффективным методом конгломерации данных является кодирование разницы между ними. В этом случае необходимо иметь точную временную привязку сигналов.

Существует ряд других приложений, в которых пакеты данных должны сопровождаться временными метками. На данный момент предложено несколько алгоритмов временной синхронизации, отличающихся точностью и энергетической эффективностью [8].

Проблема безопасности и ограничения доступа к сенсорам еще не возникла столь остро, как другие, но не трудно предвидеть, что развитие сетей, объединяющих сенсоры и актуаторы, в скором времени приведет к пересечению области действия сетей, принадлежащих различным пользователям. Кроме того, когда собираемые данные имеют коммерческую привлекательность, может появиться необходимость защиты инфор-

мации. В этом случае необходимо использовать эффективные алгоритмы распределения ключей [9].

В настоящее время стало очень популярным понятие *контроля качества обслуживания* — *Quality of Service (QoS)*. Не обошла эта тенденция и БСС [10]. В отличие от обычных телекоммуникационных сетей, QoS для БСС не может быть связано с качеством связи отдельных узлов.

Большое количество мотов и связей между ними приводит к тому, что приходится рассматривать качество работы сети целиком. При этом можно выделить два подхода к определению качества — с точки зрения приложения и сетевого взаимодействия.

Приложений БСС множество, однако они могут быть разбиты на некоторые подклассы. Например, в задачах обнаружения и сопровождения объекта параметрами QoS могут стать точность определения координат и надежность сопровождения, что в свою очередь зависит от плотности сети, способа расстановки, качества связи между мотами и пр. С точки зрения качества работы сети можно определить такие показатели, как общесетевая пропускная способность, общесетевая задержка, процент потерянных пакетов и пр. При этом качество связи точка-точка не играет здесь решающей роли и не может быть основным показателем качества сети.

Таким образом, можно констатировать тот факт, что перед нами молодая многообещающая технология, требующая самого серьезного и разностороннего подхода. Решением указанных задач активно занимаются ученые и инженеры во всем мире. Остается надеяться, что и в нашей стране ей будет уделено должное внимание.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Akyildiz I. F. et al.** Wireless sensor networks: a survey // Computer Networks. — 2002. — Vol. 38. — P. 393—422.
2. **Zhao Q., Ananthram Swami and Lang Tong.** The Interplay between signal processing and networking in sensor networks // IEEE Signal Processing Magazine. — 2006. Vol. 23. — № 4. — P. 84—93.
3. **Edgar H. Callaway.** Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. — CRC Press LLC, 2004.
4. **Al-Karaki Jamal N., Kamal Ahmed E.** Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey // Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University, Ames. — Iowa 50011.
5. **Бертсекас Д., Галлагер Р.** Сети передачи данных: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 544 с.
6. **Зайцев А.А., Устинова Е.А.** Алгоритм локального распределения обработки сигналов в беспроводных сенсорных сетях // Материалы 4-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008». — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. — С. 58.
7. **Зайцев А.А., Устинова Е.А.** Оптимизация распределенной обработки сигналов в беспроводных сенсорных сетях на базе эффективных методов маршрутизации // Доклады 10-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». — М.: Изд-во РНТОРЭС им. А.С. Попова. — 2008. — С. 317.
8. **Sundaraman Bharath, Buy Ugo and Kshemkalyani Ajay D.** Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey // Ad Hoc Networks. — 2005. — Vol. 3, № 3. — P. 281—323.
9. **Camtepe S. and Yener B.** Key Distribution Mechanisms for Wireless Sensor Networks: a Survey // In 9th European Symposium on Research Computer Security. — 2004.
10. **Dazhi Chen and Pramod K. Varshney.** QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // International Conference on Wireless Networks. — 2004. — P. 227—233.

Получено 22.04.09