

ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГОЛОСОВОЙ СВЯЗИ

А.М. Бершадский, Л.С. Курилов, А.Г. Финогеев

*Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»,
ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»;
bam@pnzgu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: беспроводные сенсорные сети; голосовой трафик; речевая коммуникация.

Аннотация: Рассмотрены основные моменты, связанные с использованием беспроводных сенсорных сетей для передачи речи. Исследованы преимущества и недостатки организации голосовой связи с учетом специфики подобного рода сетей. Описаны основные проблемы, возникающие в процессе доставки голосового трафика, а также существенные особенности этого процесса.

Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) в полной мере отражают успехи, достигнутые на современном этапе развития микроэлектроники. Благодаря таким характеристикам узлов БСС, как миниатюрность, низкое энергопотребление, встроенный радиointерфейс, достаточная вычислительная мощность, сравнительно невысокая стоимость, стало возможным их широкое использование во многих сферах человеческой деятельности с целью автоматизации процессов сбора информации, мониторинга и контроля в среде технических и природных объектов.

По сравнению с другими информационно-вычислительными сетями, БСС обладают рядом отличительных черт. Прежде всего, это касается технологии обмена данными и собственной структуры. Чаще всего сеть строится на базе набора интеллектуальных узлов (smart nodes), в которые интегрированы радиочастотные приемопередатчики (RF-трансиверы), процессорные элементы, сенсорные элементы (датчики) и элементы питания. Подобные сенсорные узлы могут закрепляться стационарно, а также иметь относительную мобильность, то есть произвольно перемещаться друг относительно друга в некотором пространстве, не нарушая при этом логической связанности сети. В последнем случае сенсорная сеть не имеет фиксированной постоянной топологии, и ее структура динамически меняется с течением времени.

Таким образом, можно выделить несколько вариантов (способов) построения сети.

1. БСС со статической топологией, заранее определенной на этапе ее проектирования с учетом различных факторов (пространственного расположения узлов, влияния радиопомех и т.д.). Такие сети имеют свои преимущества, однако, в ряде

случаев жесткая фиксация местоположения сенсорных узлов не является возможной или желательной.

2. ББС с сетевой топологией, предполагающей наличие двух структур – статической и динамической. Статическую основу структуры БСС (backbone) составляют узлы-маршрутизаторы с фиксированным пространственным расположением, подключенные к внешним источникам питания, с большей мощностью радиопередатчика. Схожую архитектуру имеют сети класса Wi-Fi с точками доступа и мобильными абонентами, и сети сотовой связи с базовыми станциями и мобильными клиентскими средствами связи. Динамическая часть БСС представлена мобильными узлами, которые могут перемещаться внутри зон ответственности маршрутизаторов, используя автоматическую поддержку механизма «перехвата» при переходе между зонами. Фактически конфигурация динамической части такой сети постоянно меняется, но с определенными ограничениями, зависящими от расположения и характеристик стационарных узлов.

3. ББС с сетевой топологией, предполагающей полностью мобильную динамическую конфигурацию сети, когда оконечные сенсорные узлы и узлы, выполняющие функции координаторов или маршрутизаторов, могут постоянно менять свое местоположение.

Соответственно, разные принципы организации архитектуры БСС требуют применения ряда специфических алгоритмов, предназначенных, прежде всего, для обеспечения эффективной маршрутизации, оптимального управления энергопитанием, реконфигурации логической топологии, самоорганизации сети в целом.

Речевая коммуникация в сенсорных сетях

БСС может представлять собой не только систему сбора и обработки телеметрической информации, но и удобную среду для передачи аудиоинформации в форме речевых сигналов [1, 2]. Это означает, что в определенных случаях целесообразно использовать инфраструктуру существующей БСС для обеспечения голосовой связи между беспроводными абонентами. При необходимости, можно специально развернуть новую сеть на основе технологии БСС для организации голосовой связи между абонентами.

Естественно, передача речи по БСС будет иметь свои недостатки, которые ограничивают ее применение. К ним относятся: большие задержки; невысокое качество речи; повышенное энергопотребление, по сравнению с энергопотреблением при передаче обычных коротких пакетов данных с телеметрической информацией и т.п.

Однако существует ряд специфических областей, где другой альтернативы нет или она недопустима по ряду особых причин. К ним можно отнести следующие случаи:

1) организацию связи и передачу голосовых команд внутри ограниченной оперативной группы в условиях:

– большой территориальной рассредоточенности и мобильности членов группы;

– значительной удаленности друг от друга периферийных членов группы на дистанциях, превышающих максимальный радиус радиопередатчика при небольшой мощности передатчика;

– обеспечения скрытной работы и требований долговременной работы передатчиков без возможности подзарядки аккумуляторов (группы специального назначения, оперативного реагирования, группы пожарных, поисково-спасательные группы, разведгруппы и др.);

2) организацию голосовой связи посредством маломощных радиопередатчиков с низким энергопотреблением для большой по численности группы людей, плотно распределенных на небольшой территории;

3) организацию голосовой связи на основе уже существующей инфраструктуры БСС с целью минимизации затрат на развертывание новой сети для передачи аудиоинформации (например, когда уже имеется развернутая корпоративная сеть на ограниченной территории);

4) организацию дешевой беспроводной голосовой связи на территориях с небольшим покрытием (например, на территории промышленного предприятия, внутри здания, в пределах поселка и т.п.).

Принципы маршрутизации в беспроводных сетях, получивших также наименование «ad hoc» или «mesh» сети, основаны на передаче данных последовательно «прыжками» от узла к узлу путем образования цепочки из соседей (multihop-передача). В такой цепи каждый промежуточный узел должен выполнять в простом случае функции ретранслятора «чужих» пакетов, а в более сложном – функции маршрутизатора (router) с поддержкой возможности определения альтернативных маршрутов и выбора оптимального [3]. Подобная архитектура сети обеспечивает определенные преимущества перед другими распространенными технологиями речевой коммуникации, например, такими как полевая, транковая и содовая системы связи.

В отличие от технологий, где ключевую роль концентраторов каналов связи играют базовые станции, для БСС технология связи опирается на метод децентрализованного управления передачей данных. Это позволяет увеличить надежность за счет избыточности ретранслирующих узлов, равномерно распределять нагрузку (аудиотрафик) в сети, автоматически регулировать пропускную способность сети, выбирая обходные маршруты с минимальной загруженностью.

Одним из важнейших преимуществ является возможность динамического адаптивного управления энергопитанием узлов и, соответственно, энергопотреблением всей сети. В отличие от классической аналоговой радиосвязи или сотовой телефонии, технология голосовой связи на базе БСС предлагает существенную экономию энергетических ресурсов, а, следовательно, и возможность более длительного времени автономной работы, прежде всего из-за применяемых средств цифровой обработки, энергосбережения и multihop-трансляции. Можно теоретически оценить данное преимущество. Известно, что при радиопередаче мощность сигнала падает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до приемника (в идеальных условиях). Отсюда следует, что и требуемое энергопотребление передатчика в общем случае зависит квадратично от расстояния. При большом расстоянии между узлом-источником и узлом-приемником в БСС можно сократить требующуюся для передачи мощность, используя промежуточные узлы-ретрансляторы. Например, чтобы передать сигнал (единицу данных) на расстояние 100 м без промежуточной ретрансляции, потребуются энергозатраты пропорционально $100^2 = 10000$. В случае, если применяется технология multihop, то передача с одной ретрансляцией с промежуточным узлом через 50 м потребует энергии пропорционально $50^2 + 50^2 = 5000$ (в два раза меньше), а с тремя промежуточными узлами через 25 м на то же расстояние (100 м) потребует энергозатрат уже в четыре раза меньше: $4 \times 25^2 = 2500$, и т.д. При этом снимаются ограничения на дальность радиосвязи, обусловленные радиусом действия, мощностью радиопередатчика или характеристиками и размерами антенны. Фактически дальность определяется существующей на данный момент топологией сети.

Для расширения сети и передачи речевых потоков на дальние дистанции, при размещении стационарных ретрансляторов БСС можно использовать существующие объекты промышленной или естественной природы, например, вышки, строения и промышленные конструкции, транспортные средства, холмы, деревья и т.д., причем без необходимости использования специально подведенного внешнего питания.

Подводя итоги, можно отметить, что данный вариант голосовой связи отличается:

- низкая себестоимость оборудования и работ по развертыванию сети;
- отсутствие необходимости тщательного проектирования и постоянной поддержки собственно сетевой инфраструктуры;
- возможность безлицензионной связи на маломощных приемопередатчиках в частотном диапазоне 2,4 ГГц (по стандарту IEEE 802.15.4);
- малые габариты и масса приемопередатчика;
- возможность длительной непрерывной работы выделенных ретранслирующих узлов без обслуживания как при питании от автономной батареи с экономией питания при низкой активности абонентов, так и при наличии других источников маршрутизации (других абонентов) поблизости, а также при работе от солнечных батарей (в течение практически всего жизненного цикла сети).

В инфраструктуру БСС легко интегрируются шлюзы в другие сети: например, узлы для обеспечения выхода голосовых абонентов в телефонную сеть общего пользования через коммутатор (АТС) с помощью обычных телефонных линий, в сотовые сети посредством GSM-модема, спутниковые сети через станцию спутниковой связи и т.д.

Особенности речевой коммуникации в БСС

Все данные внутри сети передаются и обрабатываются в цифровом виде в пакетном режиме по радиоканалам. Это означает, что, в отличие от традиционной схемы с коммутацией каналов, где выделяется гарантированная полоса пропускания для речевых сигналов, здесь передача цифровых речевых потоков должна осуществляться на основе коммутации пакетов без организации выделенных каналов для каждого сеанса связи. Это приводит к технологии обмена, похожей на Voice Over IP (VOIP) [4], но осложненной тем, что пакеты передаются в радиозфире.

Голосовой трафик транслируется в реальном времени (realtime), и категория доставки его является «немедленной». Нет необходимости вводить подтверждение доставки голосовых пакетов, поскольку задержки, связанные с повторной ретрансляцией потерянных пакетов и общие накладные расходы на доставку возрастут до неприемлемых величин. Следовательно, требуется обеспечить повышение надежности доставки другими средствами. Сама природа среды передачи обуславливает некоторое снижение качества передаваемой речи за счет влияния таких факторов, как радиопомехи, интерференция и пр.

Поэтому, с целью увеличения надежности передачи и, соответственно, повышения качества речи, необходимо применять избыточное кодирование с упреждающей коррекцией ошибок – Forward Error Correction (FEC) [5]. Такие помехоустойчивые схемы кодирования помогают в случае потери или искажения данных восстановить (для речевых сигналов – хотя бы приблизительно, в зависимости от величины потерь) исходные данные (форму сигнала). В случаях, когда потерянные фрагменты речи восстановить не удалось, обычно применяют алгоритмы аппроксимации формы речевого сигнала, чтобы заполнить временные промежутки правдоподобными данными, а не «пустотой».

Одной из особенностей также является применение низкоскоростных (low bitrate) кодеков для кодирования/декодирования речи (так называемых вокодеров) [6, 7]. На вход кодирующей части вокодера подается стандартный поток РСМ-отсчетов, например 64 кбит/с, что соответствует речи телефонного качества 8 бит с частотой дискретизации 8 кГц. На выходе кодера образуется цифровой поток со скоростью в несколько раз меньшей, чем скорость входного потока (порядка не-

скольких кбит/с). Декодер осуществляет обратное преобразование на приемной стороне. Таким образом, снижаются требования к пропускной способности каналов передачи, и обеспечивается увеличение емкости сети (в плане количества абонентов и одновременно установленных голосовых соединений) за счет максимизации использования ее ресурсов.

Поскольку с вокодерными данными требуется также передавать избыточные данные для контроля и восстановления в случае возможных ошибок, объем передаваемых данных увеличится в зависимости от сложности схемы кодирования и от рассчитываемой степени повреждения данных. Однако этот объем можно сократить в среднем более чем в два раза, применяя средство обнаружения и подавления пауз в речи – Voice Activity Detection (VAD). Учитывая тот факт, что при полудуплексной связи один абонент говорит, а другой слушает (молчит), и в разговоре существуют паузы между словами, неинформативные потоки можно отсекавать, обозначая специальными метками в пакетах начало и конец речевого фрагмента со стороны каждого абонента, что сохранит значительную часть эфирных и энергетических ресурсов сети.

Проблемы речевой коммуникации в БСС

К основным проблемам, связанным с организацией голосовых соединений в рамках БСС, можно отнести следующие.

1. Значительная задержка, вносимая в речевой тракт – чем больше в цепочке передачи ретрансляторов, тем больше задержка. Данный фактор существенно влияет на качество речи, поскольку приводит к появлению таких нежелательных эффектов как эхо, замедленная реакция собеседника, перекрытие по времени начала разговоров, что, естественно, создает большие неудобства в процессе диалога. Значение задержки порядка нескольких сотен миллисекунд считается приемлемой, однако, уровни задержки, превышающие несколько секунд, причиняют уже значительные неудобства в совместном общении. Для минимизации задержек необходимо осуществлять поиск оптимальных маршрутов с наиболее короткой траекторией ретрансляции, что не всегда и не во всех случаях возможно (например, в связи с большой загруженностью определенной части сети, дальней дистанцией между конечными узлами-абонентами). Сам процесс поиска оптимального маршрута также вносит определенные задержки, особенно перед началом диалога. С проблемой задержек тесно связана проблема так называемого джиттера, – когда пакеты с фрагментами речи приходят в разном порядке и с разными временными интервалами, и требуется их предварительная буферизация перед сборкой, что также увеличивает общую задержку.

2. Значительное потребление энергии узлами-ретрансляторами в активном режиме, поскольку они постоянно осуществляют определение маршрутов и перенаправление речевого трафика для всех остальных узлов, то есть выступают своего рода каналобразующей аппаратурой на основе коммутации пакетов. В отличие от типичной передачи сенсорных данных небольшого объема с невысокой частотой, речевой трафик создает значительную нагрузку на БСС. Для равномерного распределения рабочей нагрузки и, следовательно, равномерного распределения энергопотребления в сети, можно предложить схему периодической смены ретранслятора на основе принципа кластеризации узлов. Кластером будет являться группа близкорасположенных узлов, в которой роль (обязанности) ретранслятора будет последовательно передаваться от узла к узлу с контролем текущего состояния энергозапасов и расхода энергии всех членов группы.

3. Невысокое качество речи, обусловленное низкой скоростью передачи вокодера, ограниченной узкой полосой пропускания и низкой надежностью радиоэфира как среды передачи данных. Улучшение данного аспекта качества речи

возможно лишь при ухудшении других параметров. Например, при применении более качественного вокодера и более надежной схемы кодирования существенно возрастет скорость (bitrate), что повлечет за собой сокращение доступной полосы пропускания и ограничение одновременно установленных речевых соединений на определенных участках сети.

4. Проблема обеспечения безопасности переговоров. Несмотря на ограниченность радиуса действия передатчиков и динамическую смену маршрутов, что затрудняет перехват трафика, данная проблема остается весьма важной и актуальной в БСС, поскольку радиоэфир открыт и полностью доступен как для несанкционированного прослушивания, так и для несанкционированного подключения к сети с целью использования ее ресурсов. Естественно, обеспечение надежной защиты требует применения современных криптографических методов для шифрования голосовых данных в реальном времени с поддержкой динамически меняющегося ключа (что дополнительно увеличивает задержку), а также для аутентификации легальных пользователей сети с целью определения их полномочий по подключению к сети и правомочности использования ее ресурсов для ведения переговоров с другими абонентами (особенно это касается закрытых групп абонентов).

Заключение

Проектирование и использование БСС для голосовой связи в режиме реального времени должно выполняться с учетом множества аспектов. Необходимо четко сформулировать основные требования к безопасности связи, надежности и качеству связи, к управлению энергопотреблением узлов. Последнее особенно актуально в тех случаях, когда в качестве узлов сети используются малогабаритные мобильные приемопередатчики, работающие в автономном режиме или интегрированные (embedded) в существующие устройства (КПК, сотовые телефоны, смартфоны, коммуникаторы, рации и т.д.).

Список литературы

1. Mangharam, R. Voice over sensor networks / R. Mangharam, A. Rowe, R. Rajkumar, and R. Suzuki. // Proceedings of the 27th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS'06), IEEE Computer Society. – 2006. – P. 291–302.
2. Li, L. Qvs: Quality-aware voice streaming for wireless sensor networks / L. Li, G. Xing, L. Sun, and Y. Liu // Technical Report MSU-CSE-09-9, Department of Computer Science and Engineering, Michigan State University, East Lansing, Michigan, March 2009. – 11 p.
3. Lu, C. RAP: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks / C. Lu, B. M. Blum, T. F. Abdelzaher, J. A. Stankovic, and T. He // Proceedings of the Eighth IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'02), IEEE Computer Society. – 2002. – P. 55–66.
4. Росляков, А.В. IP-телефония / А.В. Росляков, М.Ю. Самсонов, И.В. Шиблева. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 250 с.
5. Perkins, C. A survey of packet loss recovery techniques for streaming audio / C. Perkins, O. Hodson, and V. Hardman // IEEE Network. – 1998. – Vol. 12, Issue 5. – P. 40–48.
6. Cox, R. Low bit-rate speech coders for multimedia communications / R. Cox and P. Kroon // IEEE Communications Magazine. – 1996. – Vol. 34, Issue 12. – P. 34–41.
7. Hanzo, L. Voice and Audio Compression for Wireless Communications / L. Hanzo, F.C.A. Somerville, J.P. Woodard. – 2-nd ed. – John Wiley & Sons Ltd. and IEEE Press, 2007. – 880 p.

Problems and Features of Wireless Sensor Networks Application for Voice Communication

A.M. Bershadsky, L.S. Kurilov, A.G. Finogeev

Department "Computer Aided Design", Penza State University;
bam@pnzgu.ru

Key words and phrases: speech communication; voice traffic; wireless sensor networks.

Abstract: The paper studies main points connected with using wireless sensor networks for speech transmission. The paper examines the benefits and drawbacks of voice communication taking into account the character of this kind of networks. It describes the main problems in the course of voice traffic transmission and significant features of this process.

Probleme und Besonderheiten der Anwendung der drahtlosen Sensornetze für die Organisierung der Stimmkommunikation

Zusammenfassung: In diesem Artikel werden die mit der Anwendung der drahtlosen Sensornetze für die Redetransmission verbundenen Hauptmomente betrachtet. Es werden die Vorteile und die Nachteile der Organisierung der Stimmkommunikation mit Rücksicht auf die Besonderheit der ähnlichen Netze untersucht. Es werden die im Prozess der Lieferung der Stimmverkehrs entstandenen Hauptprobleme und auch die wesentlichen Besonderheiten dieses Prozesses beschrieben.

Problèmes et particularités de l'application des réseaux sensors sans fils pour l'organisation de la communication de voix

Résumé: Dans le présent article sont examinés les moments essentiels liés à l'application des réseaux sensors sans fils pour l'organisation de la communication de voix. Sont étudiés les avantages et les inconvénients de l'organisation de la communication de voix compte tenu de la spécificité de tels réseaux. Sont décrits les principaux problèmes qui surgissent lors du transfert du trafic de voix ainsi que les particularités de ce processus.

Авторы: *Бершадский Александр Моисеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»; *Курилов Леонид Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; *Финогеев Алексей Германович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования», ГОУ ВПО «ПГУ».

Рецензент: *Подольский Владимир Ефимович* – доктор технических наук, профессор, проректор по информатизации, директор ТамбовЦНИТ, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования», ГОУ ВПО «ТГТУ».