

ные потребности различных категорий ее пользователей. В частности, наряду с совершенствованием созданной системы мониторинга промышленных и сельскохозяйственных тракторов ведутся работы по созданию аналогичных систем для зерноуборочных и специальных комбайнов и техники для лесного хозяй-

*Архипов Владимир Сергеевич* — канд. техн. наук, разработчик навигационной системы мониторинга в составе рабочей группы ОАО "НАТИ".

Контактный телефон (916) 837-62-50.

## НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ В СИСТЕМАХ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ IEEE 802.15.4

С.А. Образцов (МЭИ)

*Рассмотрена возможность внедрения беспроводных сетей физического стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee в инфраструктуру городского электрического транспорта в целях обеспечения навигации, диспетчерской связи, автоматизации управления инфраструктурой, информирования пассажиров о времени ожидания транспорта.*

*Ключевые слова: городской электрический транспорт, навигационная система, беспроводная сеть, IEEE 802.15.4, ZigBee, передача речевой информации.*

Ухудшение экологии современных городов, обострение ситуации с автомобильными пробками приводит к снижению качества жизни. Одним из направлений решения данной проблемы является приоритетное развитие экологически чистого городского электрического транспорта (ГЭТ), обладающего высокой провозной способностью. Однако в настоящее время потенциал электрического транспорта, особенно трамвая, практически не реализуется, в том числе и из-за низкого уровня организации перевозочного процесса. Внедрение информационных технологий в оперативное управление транспортом позволяет добиться не только улучшения транспортного обслуживания населения, но и увеличения его привлекательности и конкурентоспособности [1].

Особенностью ГЭТ является жесткая привязанность подвижного состава к имеющейся инфраструктуре — контактной сети и рельсовому пути. Поэтому основной задачей навигации является не определение географических координат транспортного средства, а только лишь одной координаты, однозначно задающей его местоположение. Предлагается использовать для этих целей беспроводную сеть на основе стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee, развернутую вдоль маршрутов ГЭТ. Существующие аппаратные средства, поддерживающие работу с такими сетями, позволяют легко определять местоположение мобильных узлов сети относительно стационарных с помощью метода, основанного на анализе уровней сигналов, принятых от находящихся в зоне прямой видимости узлов с известными координатами [2]. По точности такой метод не может сравниться со специальными навигационными алгоритмами GPS и ГЛОНАСС, достигающими точности <5 м. Однако для нужд ГЭТ достаточно обеспечения точности порядка 10...50 м, поскольку при средней эксплуатационной скорости 15...25 км/ч это расстояние преодолевается

≤10 с, в то время как по Правилам технической эксплуатации допускается отставание или опережение графика на 1 мин.

Следует отметить, что сети IEEE 802.15.4/ZigBee успешно применяются для определения местоположения объектов внутри помещений и на открытых промышленных площадках ограниченной площади при решении задач отслеживания движения грузов в складских терминалах, управления движением промышленных роботов, а также при автоматизации зданий. Ввиду ограниченной дальности связи применение данного класса сетей на больших площадях нецелесообразно. Однако благодаря линейной конфигурации инфраструктуры ГЭТ и возможности подачи питания от контактной сети удается построить конкурентоспособную навигационную систему с использованием беспроводной сети IEEE 802.15.4.

Сравним капитальные затраты предлагаемого и стандартного GPS/ГЛОНАСС решений на примере трамвайной системы г. Смоленска с длиной путей 22 км в двухпутном исчислении, со средней эксплуатационной скоростью 15 км/ч. Рабочий парк вагонов составляет ориентировочно 75 ед. Информационные табло для пассажиров необходимо установить на 70 остановках. Таким образом, для внедрения стандартного решения необходимо 145 GSM-модемов и 75 GPS/ГЛОНАСС навигаторов. Для реализации предлагаемого решения необходимо примерно 200 радиомодулей IEEE 802.15.4.

Цена простейших GSM-модемов и радиомодулей IEEE 802.15.4 примерно одинакова и не превышает 1000 руб., в то время как простейший GPS-модуль обходится минимум в 3500...4000 руб., а ГЛОНАСС навигаторы еще дороже. Таким образом, стоимость капитальных вложений в организацию беспроводной сети не превышает стоимости стандартного решения, а с учетом отсутствия платы за услуги GSM-связи

*В поезде читают, потому что скучно,  
в трамвае - потому что интересно.*

И. Ильф

предлагаемое решение выглядит предпочтительнее. Кроме того, как будет рассмотрено ниже, беспроводная сеть позволяет также передавать речевую и различную служебную информацию.

Беспроводная сеть IEEE 802.15.4/ZigBee является персональной радиосетью с ограниченным расстоянием между узлами. Решением Государственной комиссии по радиочастотам от 19 августа 2009 г. № 09-04-07 "О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия" максимальная мощность передатчиков данной сети ограничена на уровне 10 мВт. Расчеты и эксперимент показывают, что на открытой местности при выходной мощности передатчика 2 дБ (за 0 дБ принята мощность 1 мВт) дальность связи превышает 1000 м. При увеличении мощности передатчика до предельно-допустимого значения 10 дБ дальность связи возрастает до 1,5...2 км.

Для обеспечения надежности связи в условиях городской застройки и при плохой погоде, живучести сети в случае выхода из строя отдельных узлов расстояние между соседними узлами следует устанавливать  $\leq 500$  м. Поэтому беспроводную сеть следует развертывать вдоль контактной сети с помощью узлов-ретрансляторов, образующих стационарную подсеть с известными координатами узлов (далее — стационарные узлы).

Скорость передачи данных в сети IEEE 802.15.4 в диапазоне 2,4 ГГц составляет 250 Кбит/с. Очевидно, что даже при передаче навигационной информации один раз в секунду будет использована лишь малая доля ее пропускной способности. Оставшаяся часть пропускной способности может быть использована для передачи речевых сообщений и служебной информации. Речевая информация чувствительна к задержкам, суммарная задержка прохождения сигнала по сети не должна превышать 120 мс при полудуплексной связи. В ГЭТ для связи с диспетчером используется полудуплексная связь, задержка может достигать  $>0,5$  с без существенного ухудшения качества восприятия. Используемый в традиционной телефонии кодек G.711 создает поток 64 Кбит/с, передача которого по сети IEEE 802.15.4 крайне затруднительна. Поэтому следует использовать более мощный кодек, например, G.729, формирующий выходной поток 8 Кбит/с. Кодек G.729 оперирует кадрами дли-

ной 10 мс, при частоте дискретизации речевого сигнала 8 кГц и разрядности 16 бит (80 отсчетов за 10 мс) размер кадра составляет всего 10 байт. Поскольку объем служебной информации при передаче данных на физическом уровне для IEEE 802.15.4 составляет ориентировочно 10 байт, то целесообразно объединять кадры кодека по два в один пакет. Таким образом, передача пакета речевой информации происходит в течение 1 мс каждые 20 мс.

Передача речи является одной из наиболее распространенных нестандартных задач в сетях IEEE 802.15.4. Однако совмещение функций навигации и передачи речи с использованием стандартного протокола канального уровня вызывает значительные затруднения. Канальный уровень стандарта IEEE 802.15.4 определяет структуру суперкадра, состоящую из трех последовательных интервалов: передачи кадра-маяка, гарантированных тайм-слотов GTS и случайного доступа CSMA-CA. Для передачи речевой информации гарантированный тайм-слот следует выделять каждые 20 мс. При этом в столь малом интервале времени требуется разместить также суперкадры соседних узлов, что приводит к существенному снижению полезной пропускной способности сети из-за возрастания объема передаваемой служебной информации.

Для решения данной задачи предлагается использовать стек протоколов с модифицированным канальным уровнем и специализированными сетевым и прикладным уровнями. На канальном уровне формируется единый для всей сети суперкадр (рис. 1). По своей структуре суперкадр состоит из интервала локации и последовательности чередующихся с периодом 20 мс интервалов гарантированного и случайного доступа. Интервал локации разделен на 16 слотов, предоставляемых стационарным узлам для передачи кадра-маяка. При этом в каждом POS-кластере (объединяющем узлы в зоне прямой видимости) в течение слота только один узел передает кадр-маяк, остальные узлы работают на прием. По принятому кадру-маяку стационарные узлы других слотов производят синхронизацию внутреннего таймера. Таким образом, в POS-кластере последовательно передаются кадры-маяки стационарных узлов. Мобильные узлы в течение интервала навигации принимают кадры-маяки и оценивают уровни сигналов каждого стационарного узла, с помощью которых производят расчет своих координат.

Интервал гарантированного доступа разделен на слоты речевой, навигационной и при необходимости служебной информации. Интервал случайного доступа также разбит на слоты, при этом для случайного доступа используется алгоритм CSMA-CA, описанный в стандарте IEEE 802.15.4. Каждый мобильный узел пытается получить доступ к среде во время интервалов случайного доступа. Для увеличения вероятности доступа узла к сети один раз за несколько суперкадров, в случае успешной передачи данных алгоритм CSMA-CA

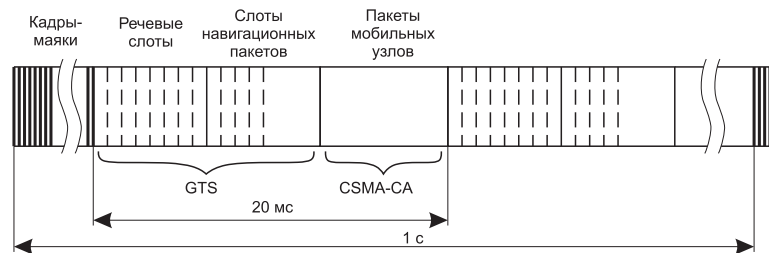


Рис. 1. Формат суперкадра

инициализируется увеличенной начальной задержкой. Для идентификации узлов на канальном уровне каждый узел имеет двухбайтный адрес.

Рассматриваемая навигационная сеть характеризуется малой связностью (число узлов в зоне досягаемости  $\leq 6 \dots 8$  ед., в исключительных случаях –  $\leq 12 \dots 16$  ед.), поэтому подобный суперкадр просто реализуется настройкой соседних узлов на различные номера слотов. Если при передаче речевой информации ретранслировать пакеты каждым стационарным узлом, то в POS-кластерах с числом узлов  $> 8$  ед. будет наблюдаться практически полная загрузка пропускной способности сети. Поэтому целесообразно ретранслировать пакеты не всеми узлами подряд по цепочке, а только лишь наиболее удаленными. Узлы-ретрансляторы определяются специальным алгоритмом на прикладном уровне.

Сетевой уровень предлагаемого стека протоколов описывает процессы маршрутизации пакетов следующих типов.

1. Пакеты речевой информации, распространяемые по всей стационарной сети. Речевой пакет имеет уникальный 14-разрядный идентификатор, инкрементируемый при передаче каждой последующей порции речевой информации. С помощью идентификатора производится устранение циклических маршрутов и "склеивание" пакетов на прикладном уровне. В случае распространения встречных волн речевых пакетов, приоритет имеет пакет с речевой информацией диспетчера.

2. Пакеты навигационной информации, передаваемые строго вдоль маршрута следования транспортного средства. При этом выделены два типа пакетов: с информацией о времени ожидания транспортного средства и с информацией о его местоположении. Пакет первого типа передается от мобильного узла в направлении его движения до тех пор, пока он "догонит" следующий впереди него мобильный узел этого же маршрута. При этом каждый стационарный узел при ретрансляции пакета увеличивает время ожидания на среднее время прохождения прилегающего перегона. Пакеты второго типа также передаются по направлению движения, однако при "обгоне" мобильного узла они не уничтожаются, а дополняются координатами опереженного узла. Данные пакеты при прохождении полного маршрута содержат информацию о координатах всех мобильных узлов маршрута, используемую в работе линейного диспетчера.

Прикладной уровень стека протоколов выполняет функции сжатия и восстановления речевых сообщений с использованием кода G.729, производит расчет среднего времени прохождения перегона, управляет процессом сбора информации о координатах мобильных узлов каждого маршрута, а также настройкой мощ-

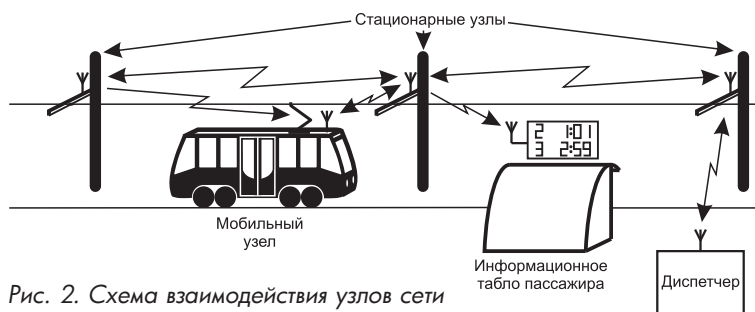


Рис. 2. Схема взаимодействия узлов сети

ности передатчиков и поддержанием работоспособности сети. В случае выхода из строя какого-либо из стационарных узлов прикладной уровень производит переконфигурацию соседних с ним узлов с целью исключения его из процесса передачи информации.

Помимо стационарных и мобильных узлов в сети имеются узлы информационных табло для пассажиров, а также узлы управления инфраструктурой (рис. 2). Узлы информационных табло работают в основном на прием пакетов о времени ожидания транспортного средства.

Представленный стек протоколов обеспечивает скорость распространения речевой и навигационной информации вдоль линий ГЭТ 25 км/с при среднем расстоянии между стационарными узлами 500 м. Следует отметить, что при наличии участков с большим числом маршрутов и транспортных узлов, в которых сходится более 3...4 линий, может потребоваться увеличение периода суперкадра с соответствующим уменьшением частоты обновления координатной информации.

Рассмотренный подход создания системы навигации является серьезной альтернативой стандартному решению GPS + GPRS. В случае установления нормативными документами обязательности использования ГЛОНАСС подобная система может стать единственным возможным вариантом для большинства хозяйств ГЭТ из-за сравнительно высокой стоимости оборудования ГЛОНАСС. Хотя рассмотренное решение не обеспечивает столь высокой точности определения местоположения транспортных средств, как средства спутниковой навигации, оно не зависит от качества предоставления услуг пакетной передачи данных GPRS, которое не всегда обеспечивается на высоком уровне в областных и особенно районных центрах РФ. Дополнительным преимуществом данного решения является предоставление возможности передачи речевой и служебной информации, что позволяет сэкономить на оплате услуг транкинговой связи.

#### Список литературы

1. Поначуин А.В. Повышение эффективности управления технологическим процессом перевозок наземным городским электротранспортом на основе применения мобильных информационно-управляющих систем // Транспортное дело России. 2009. №1.
2. Бои Дж. Определение положения устройства стандарта ZigBee // Беспроводные технологии. 2007. №4.

*Образцов Сергей Александрович — инженер кафедры промышленной электроники Национального исследовательского университета "Московский энергетический институт".*

*Контактный телефон (920) 664-56-93. E-mail: sergey.obraztsov@gmail.com*