В.Вишневский, д.т.н.;
С.Фролов
vishn@inbox.ru, НПО "Инсет"

СВЕРХВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ MESH-СЕТИ:

АРХИТЕКТУРА И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ

В работе представлен новый класс сверхвысокоскоростных широкополосных беспроводных mesh-сетей передачи информации, функционирующих в диапазоне 60–90 ГГц. Данный класс сетей обеспечивает скорости свыше 1000 Мбит/с и предназначен для построения самоорганизующихся магистральных беспроводных mesh-сетей. Высокие скорости, простота построения, отсутствие потребности в проектировании и частотном планировании, а также адаптируемость к изменениям делают разрабатываемый класс сетей лучшими из существующих сегодня.

ТРАНСПОРТНЫЕ СЕТИ: ВЫЗОВ ВРЕМЕНИ

Сегодня широкополосные сети беспроводного доступа – одно из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. Беспроводные сети на базе технологий 3G (UMTS и cdma2000), Wi-Fi (IEEE 802.11) и WiMAX (IEEE 802.16) находятся вне конкуренции по оперативности развертывания, мобильности, цене и широте возможных приложений, во многих случаях предоставляя единственное экономически оправданное решение.

Интесивно развивается и новый перспективный класс широкополосных беспроводных сетей – mesh-сетей, массово используемых при построении локальных и распределенных городских сетей, при разворачивании мультимедийных сенсорных сетей и т.п. Основной принцип построения mesh-сети – адаптивная самоорганизация архитектуры. Он обеспечивает реализацию топологии сети "каждый с каждым", живучесть сети при отказе отдельных компонентов, масштабируемость сети (увеличение зоны информационного покрытия в режиме самоорганизации), динамическую маршрутизацию трафика, контроль состояния сети и т.д.

Стандарт IEEE 802.11s, который описывает mesh-сети, все еще находится в стадии разработки. Однако в связи с высокой потребностью в mesh-сетях многие фирмы уже выпускают соответствующее оборудование. К ним относятся такие компании, как Cisco Systems, Nortel, Tropos Networks, Proxim и др.

К 2011–2012 годам ожидается утверждение стандартов IEEE 802.11 VHT (Very High Throughput), IEEE 802.16m (WiMAX релиз 2.0), LTE Advanced (релиз 10) с одновременным появлением соответствующего оборудования и сетей, обеспечивающих скорость передачи данных до абонента на уровне 500–1000 Мбит/с [1].

Проблема в том, что скорости передачи информации в беспроводных сетях, в частности – в mesh-сетях (от 54 до 108 Мбит/с) на основе "традиционных" технологий, уже недостаточны для трансляции быстро и непрерывно растущих объемов мультимедийной информации. Скорости существенно падают с удалением базовых станций и/или иных точек доступа от абонентских терминалов, что требует увеличения их плотности. Соответственно, возрастает нагрузка на транспортные сети для трансляции информации между базовыми станциями, к шлюзам провайдеров и т.п. Безальтернативным решением данной задачи сегодня являются волоконно-оптические линии связи, в отдельных случаях дополняемые радиорелейными линиями. Однако в ряде случаев прокладка ВОЛС нецелесообразна либо невозможна. Кроме того, заслуженно популярная сегодня технология пассивных оптических сетей абонентского доступа, эффективная в многоквартир-

ных многоэтажных домах, может оказаться менее предпочтительной по сравнению с беспроводными технологиями в случае плоской застройки. В этой связи необходима разработка новой технологии и принципов построения аппаратных средств для обеспечения сверхвысокоскоростной передачи данных, голоса и видеоинформации.

MESH-СЕТЬ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Путь повышения пропускной способности беспроводной радиосети – увеличение рабочих частот. Для обеспечения пропускной способности не менее 1000 Мбит/с на любом, даже самом удаленном, узле сети наиболее целесообразным представляется работа в диапазоне 60–77 ГГц. Особенности этого частотного диапазона – малая заселенность и возможность работы в очень широких полосах (порядка 1–2,5 ГГц), что позволяет обеспечить высокую пропускную способность сети. Кроме того, сигнал миллиметрового диапазона подвержен сильному затуханию в атмосфере. В традиционных сетях связи это – недостаток, но в предлагаемой системе является достоинством, поскольку позволяет избежать взаимного влияния близкорасположенных узлов сети. Решается также вопрос монопольного использования частотного ресурса, позволяя одновременно нескольким сетям работать в непосредственной близости. Для уменьшения деградации пропускной способности сети при увеличении числа узлов предполагается использовать трансиверы с частотным дуплексом и радиопротокол с динамическим поллингом.

Предлагаемая технология позволит строить сеть абонентского доступа в кратчайшие сроки при минимальном инвестировании в капитальное строительство и исключает временные и прочие затраты на частотное планирование. Сеть, все узлы которой являются ретрансляторами, будет работать на любой пересеченной местности и в условиях плотной городской застройки. Сеть может быть развернута как на длительный срок, так и временно. Являясь сверхвысокоскоростной, сеть обеспечит возможности по пропускной способности, доступные сегодня только проводным сетям. Рассмотрим принципы организации и аппаратной реализации подобной сети.

Сразу отметим, что стандарт IEEE 802.11s [2] нельзя рассматривать как основу для магистральной сети в силу высокой степени деградации пропускной способности Wi-Fi mesh-сети при

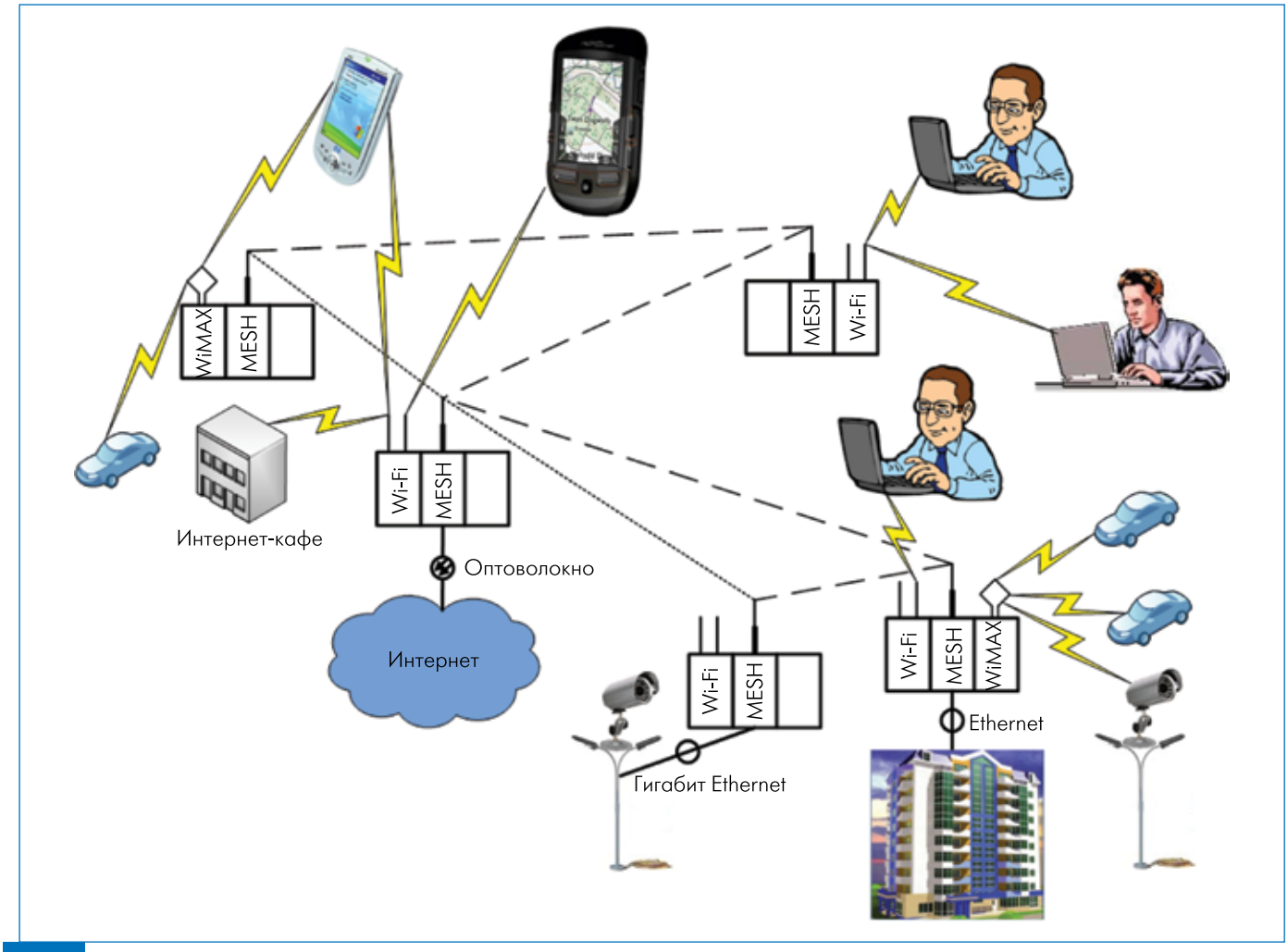

Рис. 1 Вариант архитектуры сети

OLSR (Optimized Link State Routing) – это описанный в документе IETF RFC 3626 [6] проактивный протокол маршрутизации для мобильных ad hoc-сетей. Он поддерживает маршрутные таблицы в узлах сети при помощи регулярных процедур обновления маршрутной информации в сети. OLSR основан на понятии многоточечной эстафеты MPR (MultiPoint Relay). Каждый узел сети m выбирает несколько узлов из числа своих соседей (т.е. из узлов, с которыми у него установлено соединение). В итоге в сети формируется набор узлов MPR(m). Причем он формируется так, что все узлы, находящиеся в сфере с радиусом 2 шага от узла m (соседи соседей), имеют симметричные каналы с MPR(m). Это означает, что узлы MPR связаны со всеми узлами в сфере с радиусом 2 шага. MPR выбираются каждый раз, когда обнаруживается изменение в сфере с радиусом 1 или 2.

Каждый узел сети хранит свою таблицу маршрутизации, которую формирует на основании информации о топологии сети. Она распространяется по всей сети посредством служебных пакетов выбора маршрута Topology Control (TC). Причем только MPR-узлы участвуют в пересылке TC-пакетов, остальные узлы принимают и обрабатывают такие пакеты, но не пересылают их дальше.

Для каждого MPR формируется список соседних узлов, выбравших его в качестве MPR, – список MPR Selectors (MPRS). Информация о MPRS передается в специальных HELLO-пакетах, которые передаются только между двумя соседними узлами. В сеть (в TC-пакетах) передается только информация о состоянии соединений между MPR и его MPRSs. Данный механизм позволяет существенно снизить число передач служебных пакетов по сравнению с лавинной рассылкой [6, 7].

OLSR разработан как совершенно распределенный протокол, он не зависит от каких-либо корневых узлов. Кроме того, каждый узел шлет контрольные пакеты периодически, поэтому протокол устойчив в случае потери части этих сообщений, что довольно часто случается с широковещательными пакетами в беспроводных сетях.

большой плотности расположения узлов сети и в случае многошаговой передачи. Один из путей преодоления данной проблемы видится в оснащении каждого узла двумя ВЧ-портами, позволяющими узлам работать в полнодуплексном режиме. Вся сеть использует всего два номинала частот, образующих дуплексную пару частот. Избежать проблемы частотного планирования позволяет механизм адаптивного выбора частот дуплексной пары (режим Flexible Duplex) в зависимости от местоположения ячейки в mesh-сети и расположения соседних ячеек.

АРХИТЕКТУРА СЕТИ

Узлы mesh-сети должны находиться на высотных зданиях, вышках и т.д. таким образом, чтобы расстояние между соседними узлами не превышало 500 м. Ограничение по расстоянию получено из расчета мощности излучаемого сигнала и его затухания. Абоненты подключаются к некоторым (или к каждому) узлам сети по проводной, Wi-Fi-, WiMAX- или LTE-сети (рис.1). Некоторые узлы могут иметь проводной выход в глобальную сеть. Таким образом, информация от абонента, прежде чем попасть к другим абонентам или в глобальную сеть, может проделать многошаговый путь по транспортной сети. Как правило, в транспортной сети будет существовать несколько маршрутов от отправителя к получателю, и путь должен выбираться с учетом загрузки узлов сети.

Назначение такой сети – это подключение локальных сетей, мобильных пользователей и т.д. к глобальной сети и соединение их друг с другом без дорогостоящей и длительной прокладки кабеля и проектирования сети. При расстояниях между узлами 500 м сеть из 100 узлов будет покрывать территорию порядка 25 кв. км, причем для такой территории будет достаточно одного узла подключения к глобальной сети. Таким образом, предполагается, что размер сети не превышает 100 узлов, в случае большего размера сети происходит ее кластеризация.

В магистральной сети изменения в топологии происходят крайне редко, и, следовательно, процедура переконфигурации mesh-сети может быть относительно длительной, но автоматической.

Все функции управления, координации и маршрутизации в сети выполняет один – корневой – узел. В этом состоит существенное отличие от алгоритмов mesh-сети стандарта IEEE 802.11s и накладывает на сеть некоторые ограничения. Однако для магистральной сети можно допустить, что корневой узел практически никогда не меняется и не покидает сеть. Задача корневого узла – вычисление и распределение временных ресурсов между существующими в сети потоками данных (распространение расписания среди узлов), а также создание и распространение по сети маршрутной информации, основываясь на полученной от узлов информации об их соседних узлах и качестве связи с ними. При этом сеть ориентирована на работу именно с потоками данных (сервисными потоками в терминологии IEEE 802.16), а не с отдельными пакетами, так как выделение ресурсов под отдельный пакет – задача чрезвычайно трудоемкая и длительная. Все узлы сети информируют корневой узел о возникновении, изменении и исчезновении потоков данных, источником которых они являются.

Корневой узел назначается автоматически по определенному алгоритму. Функции корневого может выполнять любой узел сети. Если в результате изменения топологии корневой узел сам покидает сеть, то все узлы независимо друг от друга определяют новый корневой узел по определенной схеме и направляют ему запросы на выделение ресурсов. Будущий корневой узел, вычислив, что он является таковым, немедленно приступает к выполнению новых функций.

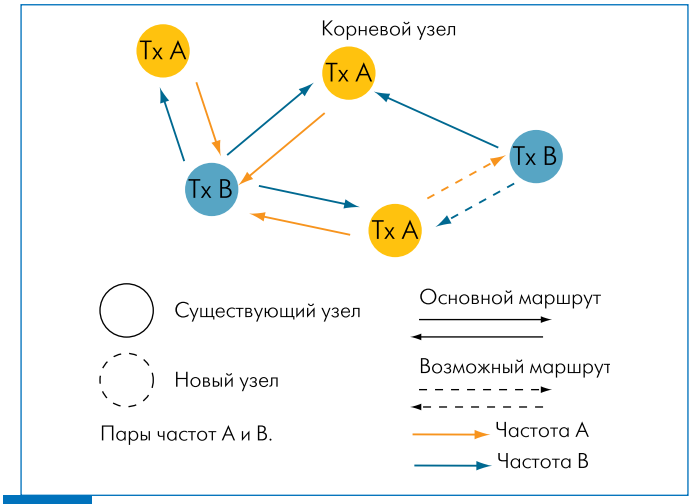

Рис.2 Назначение дуплексных пар частот

В сети используются всего два частотных номинала, однако одна и та же частота может использоваться различными устройствами для приема и передачи (рис.2). Это возможно в силу быстрого затухания сигнала мм-диапазона, что обеспечивает возможность многократного использования частот. Таким образом, каждое устройство должно выбрать одну из двух возможных дуплексных пар частот. При включении в сеть устройство должно правильно выбрать частоту для приема и для передачи. При этом оно некоторое время прослушивает среду на обеих частотах. Устройство выясняет, какова топология сети и какие узлы являются соседними. Затем оно определяет, при каких передающей/принимающей частотах будет достигнута максимальная связность сетевого графа. После этого узел переключает один из двух своих радиоинтерфейсов (соответствующих двум частотным номиналам) в режим передачи и начинает процедуру подключения к сети. Например, если некий узел использует частоту A для передачи и B – для приема, то для прямой связи с ним другой узел должен использовать частоту B для передачи и A – для приема, т.е. смежную дуплексную пару.

При изменении топологии или неравномерной загрузке сети корневой узел может принять решение о смене пар частот для части узлов сети. В этом случае корневой узел рассылает узлам новую топологию сети с указанием измененных пар частот и указывает время, когда данные изменения вступят в силу.

МАРШРУТИЗАЦИЯ

В новой сети предполагается использовать протокол маршрутизации, незначительно отличающийся от хорошо известного протокола OLSR [3, 4]. То есть узлы в данном протоколе будут использовать одношаговую передачу Hello-пакетов для определения соседних узлов и выбора узлов многоточечной эстафеты (MPR). Однако пакеты с топологической информацией (TC – Topology Control) от узлов сети распространяются не широковещательно, а к корневому узлу, который, сохранив маршрутную информацию, периодически распространяет ее посредством стандартных широковещательных TC-пакетов. Тем самым минимизируется объем трафика служебной информации в сети.

В маршрутные таблицы включается информация о соседних узлах с учетом того, что при совпадении дуплексных пар узлы не могут передавать данные непосредственно друг другу, поэтому не являются соседними номинально – соединения между ними не существует. Данная информация позволит рассчитать, как изменится топология сети при смене дуплексных частотных пар.

СТРУКТУРА СУПЕРКАДРА

Весь обмен в сети происходит посредством так называемых суперкадров длительностью по 2 мс. Каждый суперкадр состоит из служебной части длительностью 100 мкс и следующей за ней части передачи данных (Data) в 1900 мкс (рис.3). Поле Data разбивается на 950 тайм-слотов длительностью по 2 мкс. Информация в поле данных предназначена различным узлам сети в соответствии с расписанием, которое согласуется в служебной части суперкадра.

Служебная часть состоит из двух полей – управляющего (Control) и расписания (Schedule). Поле Control (в стандартном случае – 25 минислотов по 1 мкс каждый) используется для передачи запросов, пакетов обмена информацией о соседних узлах и прочих пакетов небольшого размера. Один минислот содержит порядка 1000 бит информации, что позволяет передавать служебные пакеты практически всем узлам сети.

В поле Control каждый узел постоянно передает данные в заданный ему момент времени. Новый узел при подключении выбирает момент для передачи так, чтобы не вступать в конфликт ни с одним из соседних узлов. В случае очень высокой связности, когда новый узел не может выбрать себе слот для передачи (практически невозможная ситуация), он инициирует запрос к корневому узлу с целью оптимизации распределения времени и назначения узлам новых интервалов для передачи либо, если передача невозможна, для увеличения поля Control на 1 мкс.

Поле Schedule (стандартная длительность 75 мкс) предназначено для распространения расписания, содержащего информацию о том, какому узлу сети назначен тот или иной тайм-слот в поле данных суперкадра.

Отметим, что в отличие от других сетей с кадровой структурой, в рассматриваемой mesh-сети суперкадр принимается каждым узлом полностью и также полностью ретранслируется по заданному корневым узлом маршруту. При этом отдельный узел может изменять информацию в выделенных ему тайм-слотах, в соответствии с расписанием, передаваемым в поле Schedule.

Все размеры полей в суперкадре могут динамически изменяться. Например, корневой узел может увеличить дли-

Рис.3 Структура суперкадра

тельность полей Control или Schedule. Более того, когда служебная часть слишком велика, сам суперкадр может быть увеличен с целью повышения пропускной способности.

Стоит отметить, что ввиду глобальной синхронизации сети вновь созданное расписание, информация об изменениях размеров полей суперкадра и прочие аналогичные сведения распространяются по сети вместе с информацией о том, когда (через сколько суперкадров) данное изменение вступает в силу. Корневой узел, сообщая о таких изменениях, рассчитывает, через какое время они достигнут всех заинтересованных получателей, и включает его в свой служебный пакет. Таким образом, вводится задержка в реакцию сети на изменения топологии или потоков данных. Однако при правильном выборе корневого узла и разумных топологиях данные изменения происходят достаточно быстро.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Аппаратура узла включает несколько функциональных элементов – антенную систему, тракт промежуточной частоты, микропроцессорный модуль, а также модули абонентского и сетевого доступа (рис.4). Антенная система узла формирует круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и 10–12° – в вертикальной. В результате узел может работать без предварительной юстировки как в режиме оконечной станции, так и в режиме ретранслятора. Антенная система по команде микропроцессорного модуля может изменять частоты дуплексной пары. В результате не нужна механическая замена СВЧ-фильтров, отпадает и необходимость в нескольких видах частотно-зависимых компонентов в системе. Для получения усиления системы, необходимого для устойчивой работы на расстояниях до 500 м, передающая и приемная часть антенной системы разделена на шесть секторов. Каждый сектор обслуживается отдельным каналом СВЧ-трансивера и состоит из двух планарных антенн, СВЧ-фильтров, антенного переключателя, малошумящего усилителя (МШУ), усилителя мощности (УМ) и смесителей. Антенный переключатель, МШУ, УМ и смесители могут быть сформированы на одном кристалле, который в свою очередь установлен на печатной плате и работает на линии питания антенных элементов. Такая конструкция позволяет не только унифицировать все узлы антенной системы, но и синтезировать необходимую диаграмму направленности, концентрируя излучение в пространстве в нужном направлении и ослабляя мешающие сигналы с других направлений. Антенный переключатель является управляющим элементом выбора дуплексной пары частот для каждого узла в сети.

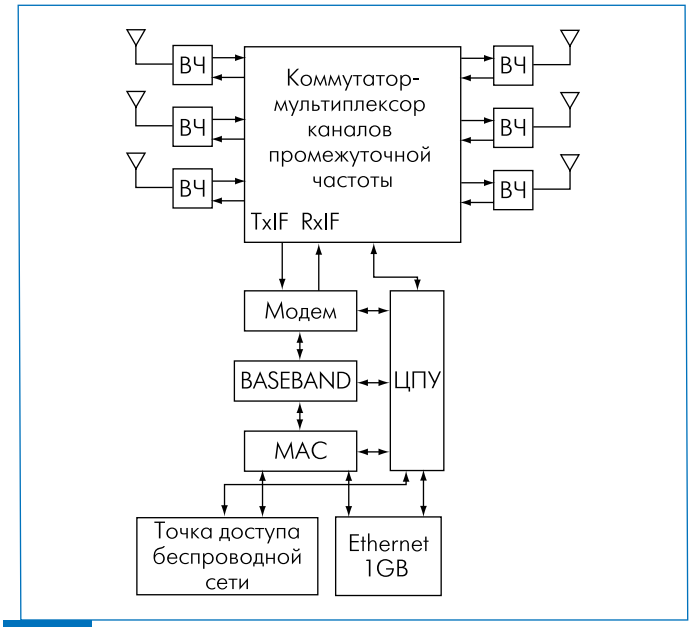

Рис.4 Структурная схема аппаратуры узла

Тракт промежуточной частоты состоит из программно управляемого модулятора-демодулятора (модем) ВЧ-сигналов, быстродействующего коммутатора-мультиплексора каналов промежуточной частоты, генератора опорной частоты и схем управления. Коммутатор-мультиплексор каналов промежуточной частоты подключает к модему только те сектора антенной системы, по которым в данный момент происходит обмен информацией. Это обеспечивает пространственную селекцию радиосигналов. В результате, с одной стороны, снижается нагрузка на радиосреду и увеличивается помехоустойчивость системы. С другой стороны, ослабляется влияние соседних узлов и возрастает соотношение сигнал/шум в приемном тракте. Коммутатор-мультиплексор обеспечивает независимую коммутацию каналов приема и передачи, позволяя принимать сигнал от одного сектора узла, а вести передачу другому узлу сети через другой сектор антенной системы. Таким образом обеспечивается ретрансляция в реальном времени, исключая существенные задержки на буферизацию данных. Генератор опорной частоты синхронизирует по фазе гетеродины СВЧ-трансиверов антенного тракта системы.

Микропроцессорный модуль обеспечивает управление всеми функциональными элементами узла сети. Он участвует в поддержке радиопротокола магистральной сети, осуществляет коммутацию пакетов на уровне "магистральная сеть – проводной сегмент – абонентская сеть". Контролирует частоты приема и передачи в зависимости от положения узла в магистральной сети. Модуль постоянно обменивается служебной информацией с другими узлами и содержит в памяти актуальную информацию о конфигурации всей магистральной сети. Это необходимо для корректной работы протоколов передачи между узлами mesh-сети.

Модули абонентского доступа предназначены для подключения конечных абонентов к узлам магистральной сети. Они работают в стандартных диапазонах систем широкополосного радиодоступа и обеспечивают подключение как стационарных, так и мобильных абонентов систем Wi-Fi, WiMAX, LTE и т.п. Для подключения модуля абонентского доступа служит отдельный слот, являющийся интерфейсом микропроцессорного модуля.

Для подключения узла к проводному сегменту сети передачи данных узел оснащен интерфейсом Gigabit Ethernet (GE). Он предназначен как для подключения узла и собствен-

Сравнение технологий построения магистральных линий связи для участка "точка-точка" длиной 5 км

Тип линии связи	Скорость, Мбит/с	Стоимость, тыс. долл.	Удельная стоимость, долл./(км×Мбит/с)
ВОЛС	1000	20	4
Радиорелейная линия (28 МГц, 256-QAM)	250	30	24
IEEE 802.11 (RadioEthernet)	20	3	30
Mesh-сеть	1000	10	2

но всего mesh-сегмента к глобальной сети, так и для подключения абонентских ЛВС.

В заключение отметим, что предлагаемая сверхвысокоскоростная широкополосная беспроводная mesh-сеть обладает рядом существенных преимуществ перед существующими технологиями. К ним можно отнести высокую скорость развертывания, отсутствие необходимости частотного планирования, возможность достичь низкой стоимости оборудования, гибкость и адаптивность архитектуры. Инвестиции в развертывание и обслуживание такой сети существенно ниже, чем для современных сетевых технологий, обеспечивающих аналогичные скорости передачи (см. таблицу). В таблице представлен частный случай для построения одной линии. Хотя даже в этом случае mesh-сеть существенно превосходит все прочие технологии построения магистральных линий связи, однако гораздо в большей степени ее преимущество раскрывается при расположении узлов в виде сетки, покрывающей большие площади с возможностью подключения устройств Wi-Fi и WiMAX.

Сеть можно развернуть не только быстро, но и на неподготовленных площадках, включая автомобили. Поскольку все узлы являются ретрансляторами, сеть будет успешно функционировать на любой пересеченной местности, включая плотную городскую застройку. Подобная сеть позволит передавать весь современный контент, доступный сегодня только в проводных сетях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.** Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: – Техносфера, 2009.
2. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Mesh Networking // IEEE P802.11s/D2.02, September 2008. 254 p.
3. **Clausen T., Jacquet P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). // IETF RFC 3626, October 2003.
4. **Вишневский В.** и др. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11s: протоколы маршрутизации. – Первая миля, 2009, № 1, с. 16–21.