

Mesh-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11s –

ТЕХНОЛОГИИ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Опубликованный десять лет назад стандарт локальных сетей беспроводного доступа IEEE 802.11 (беспроводный Ethernet) оказался настолько удачным, что продолжает развиваться до сих пор. Ему уже давно стало тесно в рамках сотен метров, отведенных локальным сетям. На основе оборудования 802.11 строятся – и вполне успешно – как персональные сети, так и сети городского масштаба. Одним из направлений в развитии стандарта стала технология mesh-сетей, которую разрабатывают в рамках грядущего стандарта IEEE 802.11s. Это тот случай, когда потребности рынка и сами производители обгоняют усилия по стандартизации – стандарта пока нет (но вскоре ожидается), а оборудование и сети уже строятся.

Mesh-сети – новый перспективный класс широкополосных беспроводных сетей передачи мультимедийной информации, который в ближайшие годы найдет широкое применение при построении локальных и распределенных городских беспроводных сетей (альтернатива WiMAX), при разворачивании мультимедийных сенсорных сетей и т.д. Одним из главных принципов построения mesh-сети является принцип самоорганизации архитектуры, обеспечивающий такие возможности, как реализацию топологии сети "каждый с каждым"; устойчивость сети при отказе отдельных компонентов; масштабируемость сети – увеличение зоны информационного покрытия в режиме самоорганизации; динамическую маршрутизацию трафика, контроль состояния сети и т.д. Mesh-сети могут быть стационарными или мобильными. В последнем случае все или часть узлов со временем могут менять свое местоположение. В мобильных сетях в качестве узлов могут использоваться карманные ПК, мобильные телефоны и другие персональные устройства.

Mesh-сети описывает стандарт IEEE 802.11s, который находится на стадии разработки (первая версия ожидается не ранее чем через год). Наиболее новый черновой (draft) вариант стандарта IEEE P802.11s/D2.0 представлен в апреле 2008 года. Однако в данной работе мы будем опираться на предыдущую версию draft-стандарта IEEE P802.11s/D1.08 (январь 2008) [1] с учетом отдельных аспектов, представленных в предшествующих версиях – D1.07 (сентябрь 2007), D1.06 (июль 2007) и D1.00 (ноябрь 2006).

ПРОТОКОЛ IEEE 802.11s

В существующих сетях стандарта 802.11 терминальные (абонентские, конечные) станции (STA) связаны с точками доступа (Access Point – AP) и могут взаимодействовать только с ними. AP имеют выход в другие сети (например, Ethernet), но не могут обмениваться информацией друг с другом (рис.1а). В mesh-сети, помимо терминальных станций и точек доступа, присутс-

твуют особые устройства – узлы mesh-сети (Mesh Point – MP), способные взаимодействовать друг с другом и поддерживающие mesh-службы (рис.1б). Одно устройство может совмещать несколько функций. Так, узлы mesh-сети, совмещенные с точками доступа, называются точками доступа mesh-сети (Mesh Access Point, MAP). Порталы mesh-сети (Mesh Point Portal, MPP), являясь MP, соединяют mesh-сеть с внешними сетями. Таким образом, mesh-сеть с точки зрения других устройств и протоколов более высокого уровня функционально эквивалентна широковещательной Ethernet-сети, все узлы которой непосредственно соединены на канальном уровне.

Отметим, что изменения в стандарте IEEE 802.11s практически не затрагивают физический уровень. Все нововведения относятся к MAC-подуровню канального уровня. Кроме того, в стандарте 802.11s рассматриваются вопросы маршрутизации пакетов в рамках mesh-сети (фактически – сетевой и транспортный уровень модели OSI), что выходит за изначальные рамки IEEE 802.11. Вопросы маршрутизации пакетов в mesh-сетях мы рассмотрим в следующей публикации, сосредоточившись в данной работе на особенностях MAC-уровня.

Структура пакетов MAC-уровня в mesh-сети (рис.2) аналогична стандартному формату пакетов сетей 802.11 [2]. Формат заголовка MAC-пакета в mesh-сети полностью соответствует MAC-заголовку пакета данных, определенному в стандарте IEEE 802.11 (за исключением поля HT Control (High Throughput Control), предназначенного, видимо, для поддержки оборудования стандарта IEEE 802.11n. Первые три поля заголовка и поле контрольной суммы FCS присутствуют во всех пакетах MAC-уровня.

Отличие MAC-пакетов 802.11s заключается в наличии mesh-заголовка в начале поля данных. Этот заголовок присутствует в пакетах данных тогда и только тогда, когда они передаются от mesh-узла к mesh-узлу по установленному между ними соединению, он так же присоединяется к одному из типов (Multihop Action) управляющих пакетов.

Mesh-заголовок содержит четыре поля. Байт mesh-флагов регулируют обработку mesh-заголовка. Пока используются только первые два бита, которые просто определяют размер расширенного mesh-адреса. Поле "время жизни пакета в mesh-сети" (Mesh Time To Live – MTL) содержит оставшееся максимальное число шагов между узлами, которое может совершить пакет в mesh-сети. Таким образом ограничивается время жизни пакета при многошаговой пересылке, что помогает бороться с образованием циклических маршрутов. Номер пакета в последовательности (Mesh Sequence Number) пресекает появление дубликатов пакетов при широковещательной и многоадресной посылке.

Поле расширения mesh-адреса (Mesh Address Extension) может включать дополнительные адреса (Адрес 4, Адрес 5

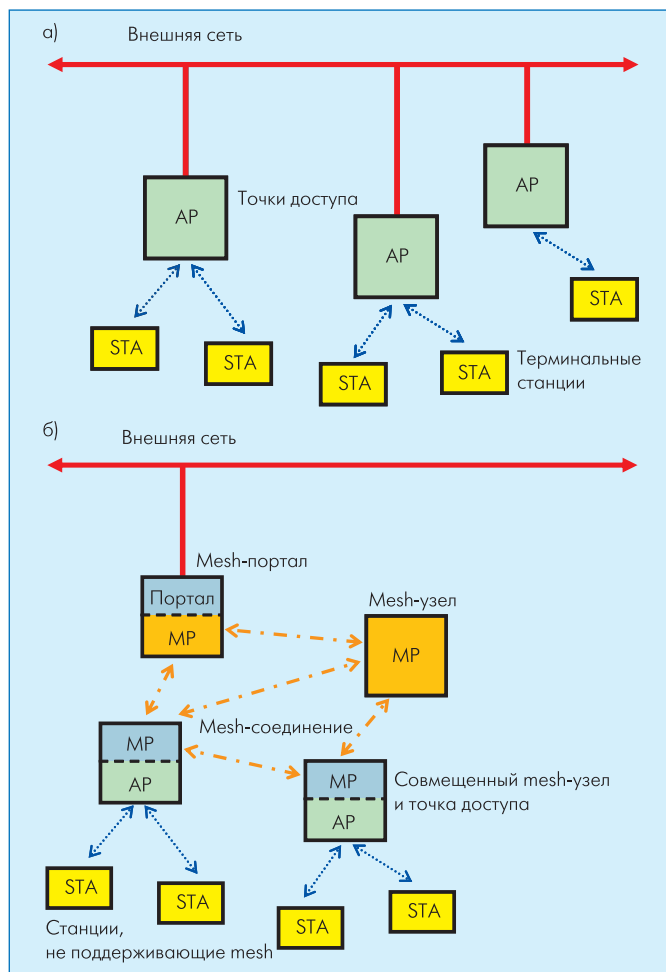


Рис.1 Архитектура сети 802.11: а) стандартной, б) mesh-сети

и Адрес 6, каждый по 6 байт), что позволяет mesh-пакетам содержать до 6 адресов. Адрес 4 используется в управляющих пакетах типа Multihop Action (при эстафетной передаче в mesh-сети), поскольку в формате управляющих пакетов MAC-уровня поле Адрес 4 отсутствует. Адреса 5 и 6 могут служить для передачи адресов конечных отправителя и получателя, если они оба или один из них не являются MP. Это возможно, если узлы вне mesh-сети общаются через mesh-сеть. Возможен и случай, когда два MP-устройства взаимодействуют через корневой узел mesh-сети, т.е. используются два отдельных mesh-пути (от отправителя до корневого узла и от корневого узла до получателя).

MDA-РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Детерминированный доступ в mesh-сети (Mesh Deterministic Access – MDA) – это опциональный механизм, позволяющий получать доступ к среде в заранее зарезервированные временные интервалы. Это снижает конкуренцию доступа к среде передачи, что позволяет существенно увеличить вероятность своевременной доставки данных, чувствительных к задержкам (аудио- и видеопотоки, данные с высоким приоритетом и т.п.).

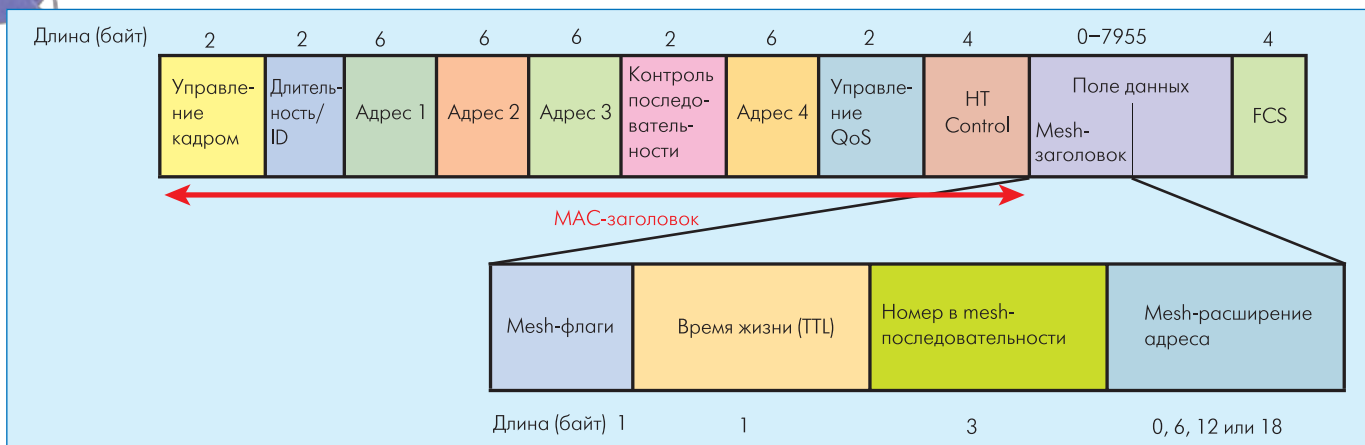


Рис. 2 Формат MAC-кадра с Mesh-заголовком

MDA-соединение может быть установлено только между станциями, поддерживающими данный механизм. MDA-резервирование задает интервалы, в течение которых поддерживающие MDA станции не пытаются передавать пакеты, чтобы не мешать передаче данных по зарезервированному каналу.

Создание MDA-соединения инициируется узлом-источником, а принимается или отклоняется узлом-адресатом данных. Для установления MDA-соединения устройство выбирает интервалы времени, не занятые другими MDA-соединениями, о которых ему известно. Если резервирование нового соединения вызывает превышение допустимого числа MDA-соединений для соседей данного узла, то устройство отказывается от создания соединения.

При установлении MDA-соединения узел направляет соответствующий запрос узлу-адресату, указав, в какие моменты времени и какой длины интервалы он хочет использовать. Получатель запроса выполняет аналогичные проверки о допустимости создания соединения с запрошенными параметрами и шлет ответ – положительный или отрицательный. Если выбранные узлом-источником временные интервалы пересекаются с другими MDA-соединениями, о которых известно получателю, он может в ответе предложить альтернативные интервалы времени. Для разрыва MDA-соединения получатель или отправитель могут послать специальный информационный элемент (MDAOP Set Teardown information element).

Все устройства, которые знают о существовании MDA-резервирований, обязаны периодически сообщать о них своим соседям (рекламировать) посредством либо специальных информационных элементов (MDAOP Advertisements information element), включенных в биконы, либо используя специальные служебные кадры (MDA action frame). Узлы, поддерживающие механизм MDA, хранят список всех резервирований, о которых узнают из рекламных сообщений и в которых участвуют сами (передают или принимают).

Важно отметить, что даже при зарезервированном MDA-интервале доступ к среде передачи происходит на конкурентной основе. При этом учитывается категория трафика, который пытается передать станция, для чего используется

механизм доступа к каналу с поддержкой дифференцированного качества обслуживания (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA).

УСТАНОВКА И УПРАВЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЯМИ В IEEE 802.11s

Совместимость устройств от разных производителей в одной сети обеспечивает концепция профилей. Профиль содержит собственно идентификатор профиля, идентификатор протокола маршрутизации и идентификатор метрики протокола маршрутизации. Устройство может поддерживать несколько профилей работы, но лишь один из них может быть активным. Обязательный для всех устройств стандарта 802.11s профиль использует гибридный беспроводной mesh-протокол маршрутизации (HWMP, Hybrid Wireless Mesh Protocol) и метрику времени передачи в канале (Airtime Link Metric).

Механизм установки соединений основан на периодической отправке стандартного сообщения "открыть соединение". В ответ на него может быть получено сообщение "подтверждение соединения" или "закрытие соединения". Соединение между двумя соседними МР считается установленным тогда и только тогда, когда оба МР послали друг другу команды "открыть соединение" и ответили подтверждением соединения (в любой последовательности). Для каждого установленного соединения предусмотрено время жизни, в течение которого оно должно быть использовано либо подтверждено.

СИНХРОНИЗАЦИЯ И БИКОНЫ В IEEE 802.11s

Стандарт IEEE 802.11 поддерживает два режима работы беспроводных сетей: hot spot и ad hoc [3]. В режиме hot spot одна из станций работает в качестве точки доступа, и данные могут передаваться только между точкой доступа и другими станциями сети. В режиме ad hoc передача возможна между любыми двумя станциями.

В режиме hot spot точка доступа регулярно рассылает специальные кадры – биконы (beacon), главная цель которых заключается в синхронизации часов станций и информировании о сервисах и режимах работы, которые поддерживает точка доступа. Биконы содержат специальное по-

ле Timestamp, в котором записано время, когда первый бит бикона оказывается переданным через радиоинтерфейс. На основании этого значения происходит синхронизация часов всех станций [4]. Синхронизация внутренних часов важна как для физического, так и для канального уровней. Например, в режиме модуляции с расширением спектра методов частотных скачков (FHSS) необходимо гарантировать, что переключение всех станций на новую частоту происходит одновременно. Также синхронизация важна для работы режима энергосбережения.

В режиме ad hoc биконы выполняют ту же функцию, что и в режиме hot spot. Но процесс передачи бикона является распределенным, т.е. в нем участвуют все станции. Станция, которая организует сеть ad hoc, задает серию моментов времени, которые называют ожидаемым временем передачи бикона (Target Beacon Transmission Time, TBTT). Последовательные моменты TBTT отделены друг от друга равными интервалами времени – бикон-интервалами. В каждый момент TBTT начинается так называемое ATIM-окно (Announcement Traffic Indication Message – сообщение уведомления о трафике), во время которого могут быть переданы только биконы или ATIM-кадры (используются механизмом энергосбережения), в то время как трансляция других пакетов запрещена для снижения вероятности коллизии.

Передача бикона основана на том же механизме конкурентного доступа с контролем несущей, что и при передаче данных. В момент TBTT каждая из станций замораживает счетчик времени отсрочки передачи данных и инициализирует таймер передачи бикона случайно выбранным числом слотов (единица дискретного времени в сети 802.11), равномерно распределенным в интервале от нуля до некоей константы ($2 \cdot \alpha CW_{min}$). Если среда передачи не занята в течение слота, станция уменьшает значение таймера на единицу. Если одна из станций начинает передачу, другие станции замораживают свои таймеры на время передачи плюс интервал времени DIFS. Если происходит коллизия, т.е. более одной станции передают одновременно, то вместо времени DIFS используется более длинный интервал EIFS. Станция начинает передачу бикона в момент, когда значение ее таймера становится равным нулю. При получении бикона от любой из станций все остальные станции отменяют передачу своих биконов.

Алгоритм посылки биконов, остающийся неизменным в течение десяти лет существования стандарта IEEE 802.11, используется и в стандарте IEEE 802.11s. Именно этот механизм поддерживает глобальную синхронизацию сети, когда все устройства работают по единому времени, привязанному к ожидаемому времени передачи бикона.

Узлы mesh-сети MP могут, но не обязаны поддерживать глобальную синхронизацию в сети. Соответственно, они подразделяются на синхронные и асинхронные MP. Асинхронные MP передают биконы подобно точкам доступа в сетях hot spot. При этом каждая станция поддерживает независимо от

других станций серию моментов TBTT и не подводит свои часы при получении биконов. Синхронные MP стараются поддерживать общее для всех время Mesh TSF.

Синхронные MP передают биконы по тому же алгоритму, что и в сетях ad hoc, за исключением следующего аспекта. Если MP получило бикон от соседнего устройства mesh-сети, оно может отменить запланированную передачу собственного бикона, но не обязано это делать, как в ad hoc сети. В mesh-сети одного бикона от случайно выбранного MP может оказаться недостаточно.

По сравнению с сетями ad hoc, mesh-сети поддерживают дополнительные mesh-сервисы, и биконы ответственны за их поддержку. Например, механизм детерминированного доступа MDA использует биконы для передачи в них специального информационного элемента MDAOP Advertisements с рекламой MDA-резервирований. Этот и другие дополнительные информационные элементы делают биконы в mesh-сети более индивидуальными, по сравнению с биконами в сетях ad hoc, которые разнятся только значением временной метки (поля бикон-кадра, описывающие возможные режимы работы станции, не меняются в течение всего времени существования сети ad hoc). Потому важно, чтобы каждое MP отправляло свой бикон как можно чаще.

В дополнение к алгоритму рассылки биконов, используемому в сетях hot spot и ad hoc, в первой версии 802.11s/D1.00 было введено понятие распространителя биконов (точки биконов) – Beacon Broadcaster (BB). Когда BB выбран, оставшиеся MP биконы не передают. Роль BB периодически передается от одного MP другому. Однако в mesh-сети некоторые станции скрыты друг от друга, что приводит к появлению нескольких BB, и задача ротации BB становится слишком сложной. В связи с этим в более поздних версиях стандарта mesh-сетей использование BB исключено.

В текущей версии IEEE 802.11s [1] сделан еще один шаг в сторону от использования принципа глобальной синхронизации mesh-сети. Дело в том, что в mesh-сети глобальная синхронизация требует больших издержек: размер ATIM-окна должен быть увеличен по сравнению с сетями ad hoc, чтобы уместить возможно большее число биконов MP. Поэтому вместо поддержки глобальной синхронизации MP могут лишь поддерживать синхронизацию попарно. При этом MP рассылают биконы независимо, без привязки к единому времени TBTT и единому ATIM-окну. Издержки сети при этом могут уменьшиться, но, по-видимому, качество ее работы снизится: без глобальной синхронизации сети трудно защитить биконы от коллизий с данными, а значит, нельзя обеспечить качество обслуживания и эффективную работу режима сохранения энергии.

Работа над дополнением к стандарту IEEE 802.11s еще не завершена. Пока не ясно, какая парадигма синхронизации будет принята в mesh-сети. Мы уверены, что глобальная синхронизация mesh-сети и алгоритм рассылки биконов, похожий на



алгоритм в сетях ad hoc, позволят обеспечить качество обслуживания (QoS) в рамках всей mesh-сети, а также применять эффективные методы энергосбережения, все более востребованные на рынке телефонов, коммуникаторов и т.п. В сети без глобальной синхронизации обеспечение QoS представляется чрезвычайно трудной, если вообще разрешимой задачей. Поэтому сегодня основное внимание уделено изучению алгоритма рассылки биконов синхронными MP, как они описаны в первой завершённой версии стандарта IEEE 802.11s/D1.00 [5].

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В IEEE 802.11s

Режим энергосбережения в mesh-сетях является опциональным. Так, MAP-узлы всегда активны, поскольку в любой момент к ним могут обратиться устройства, не поддерживающие 802.11s и соответствующий режим энергосбережения. Однако для устройств с автономным питанием (разного рода датчики, ноутбуки, телефоны и т.п.) сбережение энергии – актуальная задача.

Узлы сети обязаны сообщать о своей способности поддерживать спящий (энергосберегающий) режим. Для этого используется информационное поле возможностей (capability information field) в биконах и в ответах на пробные пакеты. В этом же поле сообщается, что узел находится в режиме энергосбережения либо имеет связь с узлом, который пребывает в этом режиме. Если устройство, желающее работать в режиме энергосбережения, видит, что его сосед не поддерживает эту возможность, то оно может либо не устанавливать соединения с таким устройством, либо установить его, но отказаться от перехода в режим энергосбережения. Узел не может переходить из активного режима в режим энергосбережения (и обратно), пока не проинформирует все устройства, с которыми у него установлено соединение, о своем желании переключиться. Для информирования соседей о смене режима энергосбережения используются пустые пакеты данных (null-data frame).

Узел в спящем режиме периодически просыпается, чтобы получить биконы от своих соседей либо послать свои. Узел просыпается по крайней мере один раз за так называемый DTIM-интервал (delivery traffic indication message – сообщение о наличии пакетов для станции) и остается активным в промежутке времени окна ATIM (Announcement Traffic Indication Message – окно для сообщений о трафике). Все узлы mesh-сети, поддерживающие режим энергосбережения, откладывают посылку пакетов, предназначенных для устройств в спящем режиме (в том числе широкоэмитальных и многоадресных) и отправляют их только в назначенный промежуток времени. О наличии этих пакетов узел-источник сообщает в сообщении Mesh TIM в биконе или в передаваемом ATIM-кадре, следующем за DTIM-биконом. Устройства, находящиеся в режиме энергосбережения, слушают такие сообщения о наличии для них данных, и если обнаруживают их, остаются активными после ATIM-окна. Если узел получил широкоэмитальный или многоадресный пакет, то он остается

активным до тех пор, пока не получит пакета, в котором поле о наличии данных (More Data field) говорит о том, что адресованных ему данных более не осталось, либо Mesh TIM элемент с той же информацией.

Спящие узлы могут проснуться в любой момент времени, если у них в очереди оказывается пакет на передачу. В этом случае такой узел остается бодрствовать, по крайней мере, до следующего момента времени TBTT.

Режим энергосбережения отличается для синхронных и асинхронных MP. Так, асинхронные MP используют свои собственные значения ATIM и DTIM, а все узлы, с которыми они установили соединение, сохраняют эти параметры для дальнейшей работы. Синхронные же MP, присоединяясь к сети, используют общие ATIM и DTIM значения, которые они получают в биконах от соседей, в этом случае все спящие устройства в сети будут просыпаться одновременно.

НЕ ДОЖИДАЯСЬ СТАНДАРТА – ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ MESH-СЕТЕЙ

Несмотря на то, что работа над стандартом 802.11s еще не завершена, многие ведущие производители телекоммуникационного оборудования и программного обеспечения уже представили свои версии реализации mesh-сетей и оборудования для них. Одно из наиболее полных и законченных решений предложила компания Cisco Systems. Она представила беспроводную платформу Cisco Aironet 1520 Series, включающую в себя точку доступа mesh-сети внешнего исполнения Cisco Aironet 1522, на базе которой и строится mesh-сеть. При этом используется закрытый фирменный протокол маршрутизации Adaptive Wireless Path Protocol (AWPP). Логика протокола скрыта, однако по косвенным данным можно предположить, что он базируется на одной из версий протокола HWMP, работающего в проактивном режиме. Управлением и мониторингом сети занимается специальное устройство – контроллер беспроводной сети Cisco Wireless LAN Controller. Компания рекомендует использовать в mesh-сетях контроллеры серии 4400. Этот контроллер также может служить центром безопасности сети, поскольку включает в себя RADIUS сервер и поддерживает ряд других служебных сервисов.

Контроллер и устройства сети обмениваются между собой служебной информацией по протоколу управления Lightweight Access Point Protocol (LWAPP). Открытая версия этого протокола редактируется и обсуждается на сайте открытого международного сообщества IETF (Internet Engineering Task Force).

Одна из самых известных в мире фирм в области mesh-сетей – компания Tropos Networks. Она, в тесном сотрудничестве с фирмой Juniper, уже реализовала свыше 500 проектов (в США и по всему миру) на основе своего решения MetroMesh. Ярким примером может служить уже год как работающая сеть Google WiFi, объединяющая более 400 маршрутизаторов в опорной сети, покрывающая более 30 км² и 25 тыс. домов для обслуживания 15 тыс. пользователей. Данного результа-

та удалось достичь благодаря разработке и использованию специального протокола маршрутизации Predictive Wireless Routing Protocol (PWRP), способного работать в больших сетях без потери пропускной способности.

Примечательно и решение компании Nortel – точка доступа Wireless Access Point 7220. Именно на его основе построена московская беспроводная сеть Golden WiFi, которая в 2007 году была признана крупнейшей городской сетью WiFi в мире. Для мониторинга и управления сетью в данном решении используется специальный графический пользовательский интерфейс ENMS, который базируется на протоколе SNMP.

Компания Firetide анонсировала точки доступа mesh-сети HotPoint серии 4000. Эти устройства осуществляют полностью прозрачный переход между существующей проводной и беспроводной mesh-сетью.

Свое решение для mesh-сетей представила и широко известная фирма Proxim. Серия устройств ORiNOCO Wi-Fi Mesh Series примечательна тем, что использует специальный протокол ORiNOCO Mesh Creation Protocol (OMCP), позволяющий использовать один и тот же беспроводной интерфейс как для формирования транспортной mesh-сети, так и для организации доступа пользователей к беспроводной сети.

Первой отечественной реализацией оборудования mesh-сетей внешнего исполнения является аппаратно-программный комплекс, разработанный Институтом проблем переда-

чи информации РАН им. А.А.Харкевича (ИППИ РАН), на базе серийно выпускаемого комплекса "Рапира" [6]. В этом оборудовании в качестве базового протокола маршрутизации используется протокол HWMP (в его текущей редакции), а также оригинальный протокол маршрутизации, разработанный в ИППИ РАН, позволяющий производить полностью прозрачный переход между существующей проводной и беспроводной mesh-сетью. Кроме того, это оборудование использует контроллер беспроводной сети, обмен данными с которым происходит по протоколу LWAPP.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE P802.11s/D1.08. Amendment: Mesh Networking. – IEEE, January 2008.
2. IEEE Std 802.11-2007. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. – IEEE, June 2007.
3. **Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.Л.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005.
4. IEEE Std 802.11, 1999 Edition. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. – IEEE, August 1999.
5. IEEE P802.11s/D1.00. Amendment: Mesh Networking. – IEEE, November 2006.
6. **Вишневский В.М., Гузаков Н.Н., Лаконцев Д.В.** Беспроводная радиоэлектронная система "Рапира". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1.