

# СИСТЕМА "РАПИРА" – БАЗИС ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Не вызывает сомнения, что широкополосные беспроводные сети передачи информации (БСПИ), основанные на серии стандартов IEEE 802.11 и 802.16, практически не имеют конкурентов по целому ряду ключевых параметров – оперативности развертывания, мобильности, производительности и широте возможных приложений. Во многих случаях это единственное экономически оправданное решение. Для нашей страны беспроводные технологии могут сыграть особую роль, поскольку позволяют экономически эффективно и оперативно решать задачи информатизации жителей России, во многих регионах которой огромная территория сочетается с невысокой плотностью населения.

В.Вишневецкий,  
Н.Гузаков,  
Д.Лаконцев

законодательству в области связи и распределения радиочастотного спектра [1].

РЭС "Рапира" – это высокопроизводительное устройство, предназначенное для построения территориально распределенных широкополосных БСПИ абонентского доступа к ресурсам Интернета, телефонных и других сетей общего пользования, а также корпоративных и ведомственных сетей с интеграцией голоса, видео, телеметрии и т.д. "Рапира" обладает полным набором характеристик, присущих современному маршрутизатору, а также рядом специальных функций, необходимых при использовании устройства в составе широкополосных радиосетей. Как правило, радиомаршрутизатор – это точка доступа БСПИ, служащая выходом во внешнюю сеть. Но наряду с этим "Рапира" может выполнять функции любого элемента БСПИ: базовой станции (БС), абонентской станции (АС), а также базовой станции с ретрансляцией (WDS Repeater).

РЭС "Рапира" представляет собой аппаратную платформу (рис. 1) с проводными и беспроводными интерфейсами. Под управлением специализированной операционной системы она реализует функции маршрутизатора.

Аппаратная платформа содержит материнскую плату и карты радиоинтерфейсов. В составе материнской платы – процессор с тактовой частотой 266 МГц, ОЗУ типа SDRAM объемом 64 Мбайт, контроллер (контроллеры) Ethernet, разъемы miniPCI и разъем для подключения Compact Flash. Радиоинтерфейсы реализованы на базе беспроводных miniPCI-адаптеров на чипсетах компании Atheros (США). Они обеспечивают поддержку протоколов IEEE 802.11 a/b/g; draft IEEE 802.11e, h, и j и режима Super AG, позволяющего достигать скорости 108 Мбит/с в канале передачи данных. Для защиты беспроводных соединений применяется аппаратное шифрование Wi-Fi Protected Access (WPA) и алгоритмы стандарта IEEE 802.11i с использованием Advanced Encryption Standard (AES), Temporal Key Integrity Protocol (TKIP) и Wired Equivalent Privacy (WEP). В модифи-

## РЭС "РАПИРА"

Основными производителями и поставщиками на российский рынок оборудования беспроводной передачи данных являются зарубежные компании. Наряду с многочисленными достоинствами, этому оборудованию, применительно к российским условиям, присущ ряд ограничений, сдерживающих его применение отечественными операторами. Среди них – высокая стоимость, низкая приспособленность к местным особенностям климата и распределения радиочастотного спектра. Кроме того, оборудование западных компаний ориентировано в основном на сектор SOHO (Small Office/Home Office), в то время как для России, в силу слабой развитости ее информационной инфраструктуры, сегодня наиболее актуально решение проблемы "последней мили". Все упомянутые факторы создали реальную почву для разработки и серийного производства новой отечественной радиоэлектронной системы гражданского назначения "Рапира" (РЭС "Рапира"), которая доступна по цене для российских операторов и максимально адаптирована к российскому

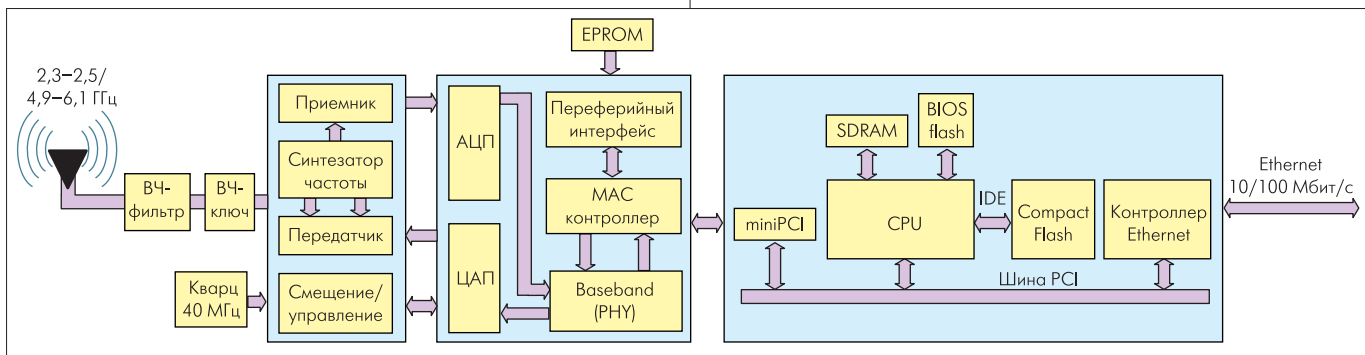
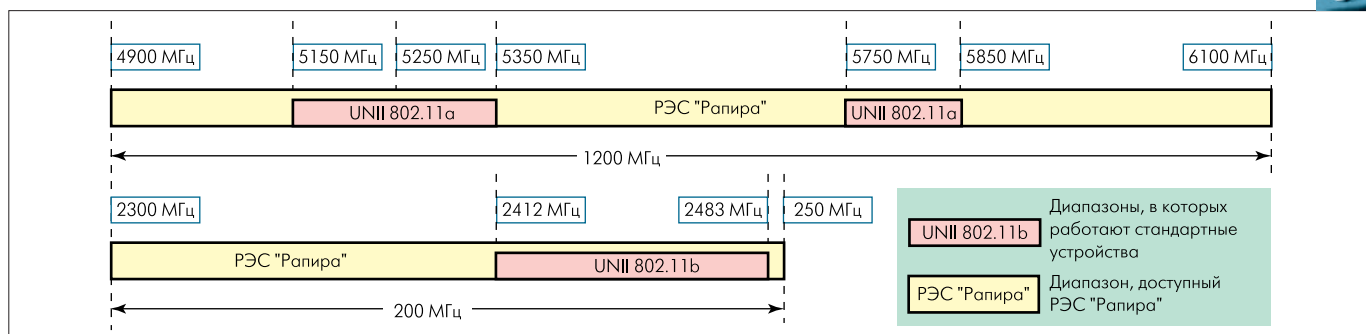


Рис. 1. Блок-схема аппаратной платформы РЭС "Рапира"



**Рис.2. Диапазон рабочих частот РЭС "Рапира"**

кации маршрутизатора с двумя радиоинтерфейсами каждый из них может быть независимо сконфигурирован, при этом устройство способно выполнять сразу две функции, например БС и АС.

Программное обеспечение РЭС "Рапира" уже включает в себя функции управления смарт-антеннами. Ведутся интенсивные разработки недорогих антенных систем, которые в скором времени будут представлены [2].

### ПРОБЛЕМА ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА

Любой оператор, решивший строить радиосеть, неизбежно сталкивается с так называемой проблемой частотного ресурса. Зарубежное оборудование беспроводной широкополосной связи работает в диапазонах 2,4–2,5 ГГц; 5,15–5,35 ГГц; 5,725–5,850 ГГц, которые в большинстве развитых стран являются не лицензируемыми (UNII), т.е. для работы в них не требуется разрешительной документации. Однако в нашей стране эти полосы частот не только лицензируются, но и относятся к классу ПР (правительственных), следовательно, могут быть выделены операторам лишь на вторичной основе.

Полоса 2,4–2,5 ГГц в большинстве регионов России полностью исчерпана и чрезвычайно зашумлена. Этот диапазон – один из первых, для которого с 1995 года производится оборудование беспроводной передачи данных. С тех пор в нашу страну не иссякает колоссальный поток "серого" оборудования, которое находит широкое применение у нелегальных пользователей. В результате диапазон 2,4–2,5 ГГц уже практически непригоден для коммерческого применения и перестает использоваться легальными операторами связи.

Полосы 5,15–5,35 и 5,725–5,850 ГГц в ближайшее время ожидает участь диапазона 2,4 ГГц, поскольку они активно осваиваются операторами, покидающими область 2,4 ГГц. Объемы серых поставок зарубежного оборудования также растут высокими темпами. В большинстве регионов России данный участок спектра уже закрепили за собой различные структуры с перспективой выгодно реализовать его в будущем. Таким образом, легальное оказание услуг в этом диапазоне сильно затруднено и доступно далеко не везде.

Ресурс полосы 3,2–3,8 ГГц, на которую ориентирован стандарт беспроводного оборудования Wi-MAX (IEEE 802.16), в значительной степени исчерпан радиорелейными и прочими узкополосными системами, установленными в предыдущие годы. В результате этот спектральный диапазон доступен операторам лишь частично.

Решающее преимущество РЭС "Рапира" заключается в том, что она способна работать в исключительно широком диапазоне частот (рис.2). Так, серийные модификации "Рапиры" функционируют в диапазонах 2,3–2,5 ГГц и 4,9–6,1 ГГц. В большинстве густонаселенных регионов России получение частотных разрешений и работа в "нестандартных" диапазонах 2,3–2,4; 5,65–5,75 и 5,85–6,1 ГГц – самый простой и разумный способ стать легальным оператором в чистом эфире!

### ЧЕТЫРЕ В ОДНОМ

Подавляющее большинство представленного на рынке оборудования для построения городских и территориально распределенных БСПИ – это простые мосты, т.е. устройства, работающие на канальном (MAC) уровне модели OSI и транслирующие кадры Ethernet между проводной и беспроводной средами. Рассмотрим распространенный случай – БСПИ, в которой клиентами БС являются АС с функцией мостов, обеспечивающих подключение локальных сетей (ЛВС) корпоративных абонентов. Какие проблемы сопряжены с такой схемой?

**Проблема безопасности.** Поскольку беспроводные мосты БС и АС прозрачны для Ethernet-трафика, отдельные корпоративные сети фактически превращаются в одну большую ЛВС, что не устраивает заказчиков, заботящихся о сетевой безопасности. Некоторые модели оборудования предлагают режим блокирования обмена пакетами между различными АС, ассоциированными с одной БС. Но тогда между клиентами невозможен обмен трафиком в тех случаях, когда это действительно требуется.

**Проблема широковещательной нагрузки.** Работа многих приложений и протоколов сопровождается регулярной рассылкой широковещательных пакетов. В крупных Ethernet-сетях с массой компьютеров под управлением ОС Windows доля широковещательного трафика может составлять существенную часть в общей нагрузке сети. Поскольку БСПИ, построенная на мостах, является единой локальной сетью, широковещательные пакеты отдельных клиентских ЛВС будут циркулировать во всей сети, существенно увеличивая нагрузку на каналы.

**Проблема управляемости.** Предположим, ЛВС одного из абонентов стала источником паразитного трафика (например, вирусного), который впустую занимает ресурс беспроводных каналов. Зачастую администратор может обнаружить эту неприятность на главном маршрутизаторе. Но в рассматриваемой схеме ее невозможно оперативно устранить, отфильтровав трафик на стороне клиента, поскольку отсутствуют рычаги контроля на уровне TCP/IP.

**Проблема отсутствия QoS.** Современные сетевые приложения реального времени, такие как IP-телефония, предъявляют весьма жесткие требования к качеству обслуживания трафика. Совместная передача по беспроводному каналу пакетов IP-телефонии и нечувствительного к временным задержкам трафика (например, HTTP или FTP) даже при минимальной загроможденности канала начнет сильно ухудшать качество голосового соединения из-за увеличения задержки пакетов в канале (delay) и значительной дисперсии этой задержки в зависимости от нагрузки на канал (jitter).

Для предотвращения перечисленных проблем ЛВС заказчика должна быть отделена от БСПИ маршрутизатором (разделяющим внутрисетевой и внешний трафик) и сетевым экраном. Маршрутизатор разрешает и проблему QoS, если он способен непрерывно анализировать пакеты данных, попадающие в его очереди на от-

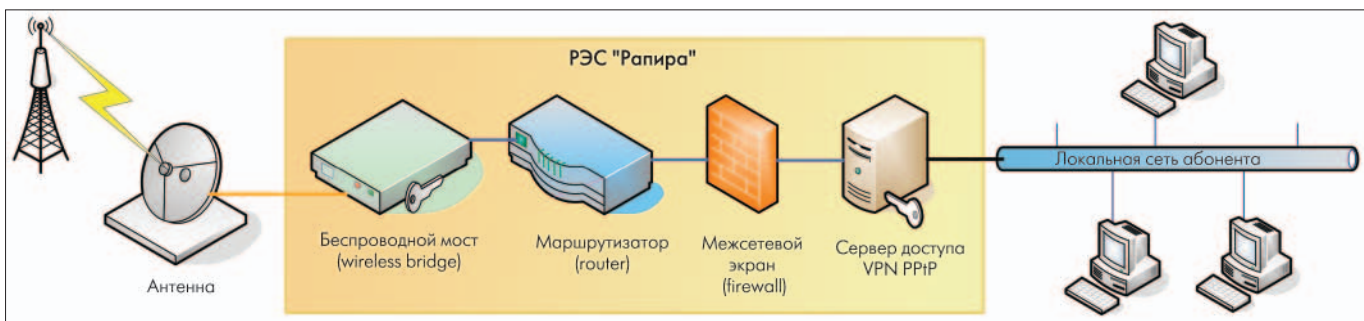


Рис.3. Логическая схема абонентского тракта

правку, проводя классификацию и приоритезацию. При этом, например, пакеты голосового трафика всегда пойдут первыми.

Однако применение перечисленных устройств увеличивает стоимость инсталляции каждого из клиентов на несколько сотен долларов. У простейших же недорогих SOHO-маршрутизаторов весьма ограничена производительность, их полоса пропускания редко превышает 2 Мбит/с, такие устройства способны лишь отчасти справиться с проблемами безопасности и широковещательной нагрузки.

В этой связи РЭС "Рапира" не только устраняет все указанные проблемы, но и обеспечивает экономию на покупке дополнительных устройств, поскольку сочетает в себе функциональность всех необходимых компонентов (рис.3):

- беспроводного моста с развитыми средствами наблюдения за трафиком, маршрутизатора с поддержкой протоколов динамической маршрутизации *rip*, *ospf* и *bgp*, а также качества обслуживания (QoS) на уровне TCP/IP;
- межсетевого экрана с возможностью анализа и фильтрации трафика вплоть до уровня приложений;
- сервера доступа, обеспечивающего создание туннелей VPN и PPP\*, шифрованных MPPE и авторизацию пользователей по протоколам PAP, CHAP, MS-CHAP.

Так, если требуется организовать ограниченный доступ в сеть с авторизацией по паролю и подсчетом трафика для клиентов ЛВС (офиса, жилого здания), РЭС "Рапира" вполне способна справиться с функцией сервера доступа PPP, взаимодействующего со стандартным сервером RADIUS. При этом унификация встроенных абонентских маршрутизаторов в сочетании с развитыми возможностями дистанционного управления этими устройствами (SSH, SNMP, WEB, HTTP) обеспечивает мониторинг сетей заказчиков непосредственно из сетевого операционного центра беспроводного оператора.

Все потенциальные проблемы безопасности радиосети сводятся к трем основным: прослушивание эфира с целью хищения важной информации кого-либо из клиентов; подмена "на лету" передаваемых данных с какой-либо целью (*forgeru*) и несанкционированное подключение к сети (кража трафика). Для предотвращения подобных эксцессов РЭС "Рапира" реализует все основные современные средства обеспечения безопасности в БСПИ, в том числе предусмотренный стандартом IEEE 802.11 алгоритм WEP (64,128,154 бита), а также более совершенные механизмы WPA-PSK, WPA-EAP с шифрованием TKIP и AES (стандарт 802.11i и WPA от Wi-Fi Alliance).

**ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

Подавляющее большинство беспроводного сетевого оборудования имеет комнатное, офисное, реже – стоечное исполнение. Практи-

ческое применение такого оборудования сопряжено с серьезными проблемами. Так, высокочастотный кабель (фидер), соединяющий собственно беспроводной модем с антенной, вносит весьма существенное затухание в сигнал, что особенно актуально для диапазонов 5–6 ГГц. Кабель с низкими потерями достаточно дорог (не менее 3–5 долл. за метр). Будучи достаточно длинным, фидер превращается в паразитную антенну. Наведенная в нем ЭДС от атмосферного электричества способна вывести из строя чувствительное беспроводное оборудование. Кроме того, в непосредственной близости от антенны часто отсутствует подходящее помещение для размещения оборудования – отапливаемое и сухое.



Рис.4. Внешний вид РЭС "Рапира"

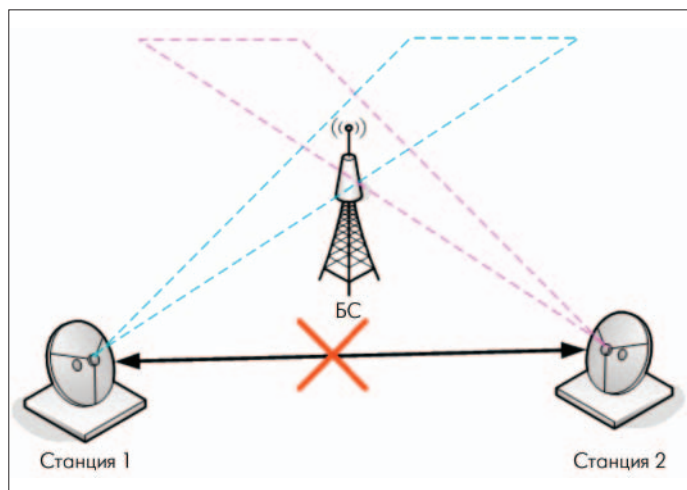
Предположим, что антенна расположена на мачте высотой 20 метров, а радиомодем – в помещении у ее подножия. Они связаны ВЧ-кабелем марки 8D-FB длиной 30 м. Цена такого фидера – порядка 100 долл., не считая стоимости монтажа. На частоте 6 ГГц затухание сигнала в кабеле составит порядка 20 дБ (мощность сигнала уменьшается в 100 раз), для компенсации которого потребуется усилитель стоимостью порядка 700 долл.

Специально для решения названных проблем РЭС "Рапира" выпускается в защищенном всепогодном исполнении, позволяющем размещать ее прямо на улице под открытым небом в непосредственной близости от антенны. При этом устройство соединяется с антенной кабелем длиной не более 1 м, что делает потери в фидере пренебрежимо малыми. Устройство герметизировано в соответствии со стандартом IP67 (выдерживает погружение в воду) и термостатировано. Корпус из толстого литого алюминия снабжен ребрами жесткости и не боится ни дождя, ни града (рис.4).

Для энергоснабжения РЭС "Рапира" использует перспективную технологию PoE (Power over Ethernet) для подачи безопасного напряжения питания 18 В непосредственно по Ethernet-кабелю. В результате единственный кабель, который требуется проложить к оборудованию на мачте или крыше, – экранированная витая пара FTP или STP Cat.5.

Обеспечение бесперебойной работы сетевого оборудования – еще одна важная проблема. Система "Рапира" допускает питание от нестабилизированных источников в широком диапазоне напряжений и специально разрабатывалась для работы с ИБП постоянного тока. Стоимость таких источников не превышает 100 долл. Низ-

\*Point-to-Point Tunneling Protocol – технология, поддерживающая многопротокольные виртуальные сети (VPN) и обеспечивающая безопасное подключение удаленных пользователей к корпоративным сетям с помощью коммутируемого соединения.



**Рис.5. Проблема скрытого узла**

кое энергопотребление РЭС "Рапира" в сочетании с высоким КПД такого источника допускает ее автономную работу свыше суток.

### ПРОТОКОЛЫ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

РЭС "Рапира" можно назвать ближайшим предшественником систем Wi-Max 802.16-2004, поскольку в ней реализованы многие характерные черты этой перспективной технологии региональных БСПИ (MAN – Metropolitan Area Networks). В то же время, РЭС "Рапира" на физическом уровне совместима со всеми беспроводными устройствами стандартов IEEE 802.11a/b/g и поддерживает предусмотренные ими схемы канального кодирования и модуляции. В том числе – ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM) с модуляцией поднесущих посредством многопозиционной квадратурной модуляции QAM.

Если в стандарте 802.11b с максимальной скоростью передачи 11 Мбит/с при использовании ССК-кодов схемы компенсации межсимвольной интерференции вполне успешно справляются с возложенной на них задачей, при более высоких скоростях, характерных для стандартов 801.11a/g, такой подход становится неприемлемым. Применение же OFDM позволяет успешно бороться с межсимвольной интерференцией – следствием неизбежного в городских условиях многолучевого распространения радиосигналов. Переотраженный сигнал попадает в защитный интервал следующего OFDM-символа и не искажает его.

Не менее актуальна проблема возрастания чувствительности приемного тракта при снижении скорости передачи. Для устройств IEEE 802.11a/g минимальная скорость работы в режиме OFDM – 6 Мбит/с. Таким образом, максимальный порог чувствительности для всех устройств составляет порядка -90 дБм. В РЭС "Рапира" предусмотрен специальный режим XR, в который устройство переходит автоматически при падении уровня сигнала в приемнике ниже -90 дБм. В этом режиме устройство способно работать со скоростями 3; 2; 1; 0,5 и 0,25 Мбит/с, что позволяет выиграть 6–10 дБ и во многих случаях сохранить связь ценой снижения скорости.

### МЕХАНИЗМЫ ДОСТУПА К СРЕДЕ. DCF vs. PCF

В стандартах IEEE 802.11 фундаментальный метод доступа к беспроводной среде – функция распределенного управления DCF. При этом базовый механизм доступа – CSMA/CA (множественный доступ к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий). Каждая станция, подчиняющаяся дисциплине DCF и механизму базового доступа, самостоятельно определяет момент своего выхода

в эфир и захвата канала. Перед началом передачи станция прослушивает канал. Если он свободен, станция выдерживает некий случайный интервал времени (Backoff) и, если канал по-прежнему не занят, начинает трансляцию. В случае коллизии, когда в эфир одновременно выходят две станции, они обе прекращают передачу и через случайные промежутки времени начинают описанную процедуру захвата канала. Поскольку вероятность совпадения случайного промежутка времени у разных станций мала, метод CSMA/CA позволяет многократно снизить вероятность возникновения повторных коллизий.

Метод DCF реализован во всех устройствах, поддерживающих 802.11. Он достаточно эффективен в БСПИ с числом узлов не более 10–15. Однако в масштабах городских и региональных БСПИ с архитектурой "точка – много точек" (PtMP), где для связи на большие расстояния используются узконаправленные антенны, применение механизма DCF со случайным доступом к среде CSMA/CA приводит к колоссальному снижению производительности всей сети.

Прежде всего, проявляется проблема скрытой точки (рис.5), в частности – при использовании направленных антенн. В городских условиях ничтожно мала вероятность того, что какая-либо из станций будет слышать все соседние, поскольку антенны ориентируются на БС и экранируются городскими постройками. У АС создается иллюзия, что среда свободна, и они одновременно начинают передачу. В результате резко возрастает число коллизий, попыток повторной передачи пакетов и как следствие – существенно падает производительность всей сети.

Для решения данной проблемы в дополнение к описанному механизму базового доступа в протоколе 802.11 предусмотрен механизм RTS/CTS (Request-to-send/Clear-to-send – Запрос на передачу/Разрешение передачи). В этом случае перед началом передачи основного пакета данных АС посылает БС короткий служебный пакет RTS, запрашивая разрешение на начало передачи. Если среда не занята и БС приняла этот пакет, она отвечает коротким пакетом CTS, разрешающим станции начать передачу. К сожалению, данный метод не решает проблему полностью. Основной его недостаток – существенное увеличение накладных расходов, связанных с задержками на передачу служебных пакетов, и рост числа коллизий, вызванных ими.

Другая, не менее важная проблема – резкое падение эффективности работы беспроводной сети при увеличении числа одновременно работающих станций. Как показывают опыт и результаты моделирования, эффективность работы БСПИ начинает резко снижаться, когда одновременно работают свыше 10 станций (рис.6). Кроме того, одна станция с большим объемом транслируемого тра-

фика способна захватить весь канал, поскольку процедура CDMA/CA практически декларирует правило "первым пришел – первым обслужен".

Специально для поддержки передачи потоковых данных в спецификации MAC-уровня 802.11 был описан еще один метод доступа к среде, названный Point Coordination Function (PCF) – в вольном переводе "функция централизованного управления". В противоположность DCF в режиме PCF только БС или АС с функцией управления (Point Coordinator) контролируют доступ к каналу.

На практике PCF реализует механизм множественного доступа с разделением по времени TDMA (Time Division Multiple Access). БС составляет и рассылает список, согласно которому каждой зарегистрированной АС предоставляется временной интервал для трансляции. В режиме PCF никакая АС не может передавать иначе как в предназначенный именно для нее период. Чтобы новые АС могли зарегистрироваться в сети, БС периодически на короткое время переходит в режим DCF, разрешая конкурентный доступ к каналу.

РЭС "Рапира", наряду с DCF, реализует стандартный протокол PCF и в режиме TDMA совместима с оборудованием других производителей, придерживающихся данного стандарта.

### СНИЖЕНИЕ ИЗДЕРЖЕК

Проблема накладных расходов при передаче информации актуальна для любых протоколов БСПИ. Для MAC-уровня протоколов IEEE 802.11 наиболее значимы издержки на трансляцию служебных полей в пакетах (преамбулы, заголовка, поля контрольных сумм), а также общая длительность разделяющих кадры интервалов (Backoff, DIFS и SIFS). Трансляция заголовков весьма длительна, поскольку всегда происходит на минимально возможной скорости модуляции (1 или 6 Мбит/с), дабы гарантировать их надежное получение. Кроме того, каждый кадр переданных данных квитируется специальным ответным кадром подтверждения приема ACK. Время ожидания ACK может быть существенным, в том числе вследствие конечной скорости распространения радиоволн.

Для минимизации издержек предусмотрен ряд механизмов, один из которых – метод групповой передачи кадров (frame bursting), заложенный в проект стандарта 802.11e. В РЭС "Рапира" он реализован в виде усовершенствованной распределенной функции управления eDCF. Суть метода – вместо того, чтобы конкурировать за доступ к каналу для передачи каждого кадра, АС делает это один раз перед трансляцией серии кадров.

Другой метод, поддерживаемый РЭС "Рапира", – объединение нескольких кадров малой длины в один кадр максимально возможного объема (метод Fast Frames). На приемной же стороне длинный кадр вновь фрагментируется (рис.7). При этом пропорционально

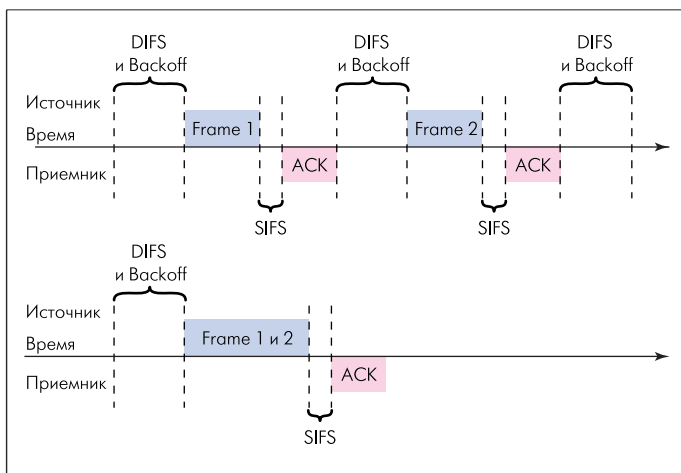


Рис.7. Метод передачи кадров Fast Frames

числу объединенных кадров устраняются накладные расходы, характерные для отдельного кадра.

Дополнительный выигрыш при передаче РЭС "Рапира" достигается за счет компрессии данных с помощью популярного алгоритма Ziv. Перед трансляцией данные на аппаратном уровне сжимаются, в приемнике – восстанавливаются. Весь процесс происходит в режиме реального времени и не затрагивает канальный протокол.

Таким образом, можно констатировать, что РЭС "Рапира" – эффективное средство построения широкополосных БСПИ регионального масштаба. Система создавалась с учетом национальных особенностей эксплуатации и вобрала в себя наиболее передовые технологии и механизмы. Залог чему – опыт разработчика и производителя системы, Института проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН). Еще в 1996 году в ИППИ РАН была разработана и реализована широкополосная региональная БСПИ Radionet [3, 4]. За годы ее эксплуатации был накоплен большой практический опыт в области строительства и эксплуатации широкополосных БСПИ, детально изучен спектр сопутствующих проблем. При этом в образцах оборудования различных производителей были выявлены конструктивные и системные недостатки, которых удалось избежать в собственной разработке РЭС "Рапира".

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вишнеvский В.М., Гузаков Н.Н., Мацнев Д.Н. Разработка серии отечественных радиоустройств для комплектации широкополосных беспроводных региональных сетей передачи данных, голоса и видеоинформации. – Труды международного семинара "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети". Москва, 2004.
2. Вишнеvский В.М., Гузаков Н.Н. Многолучевые антенные системы для базовых станций широкополосных радиосетей. – Труды международной конференции "Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems". Барселона, 2004.
3. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.
4. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Мацнев Д.Н., Терещенко Б.Н., Целикин Ю.В. Сеть Radionet: опыт разработки и реализации. – Труды VII Международной конференции "Информационные сети, системы и технологии" ICINASTe-2001. Т.2. – Минск, БГЭУ.

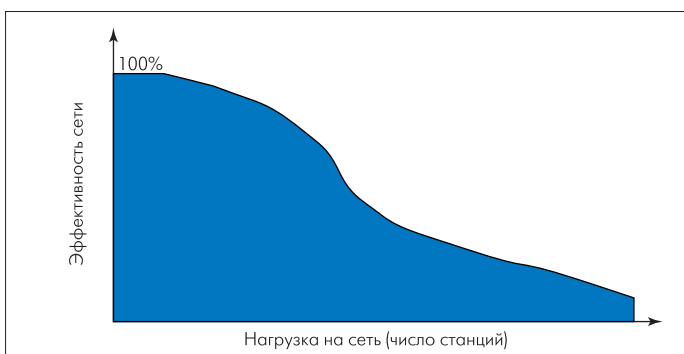


Рис.6. Зависимость эффективности работы беспроводной сети от числа одновременно работающих станций