

# Мобильные радиосети

## перспективы беспроводных технологий

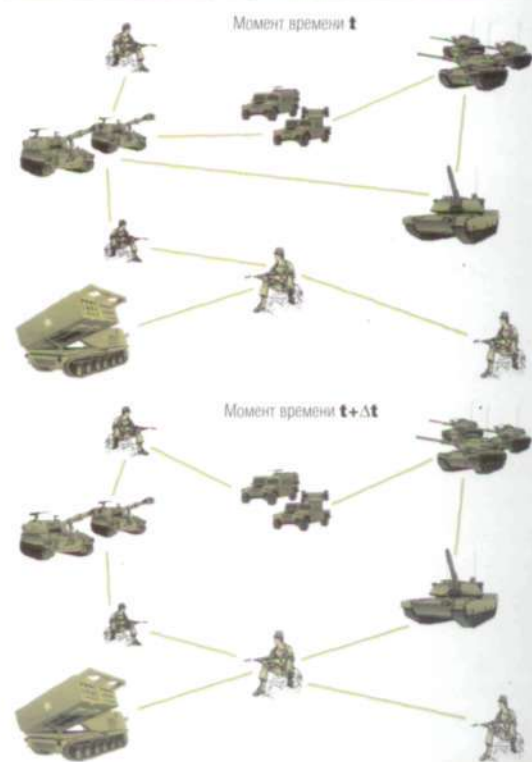
Мобильные радиосети, в которых отсутствуют базовые станции (точки доступа) и фиксированные маршруты передачи, вскоре должны прийти на смену традиционным беспроводным решениям, а в перспективе способны дополнить или даже заменить традиционные сотовые сети.

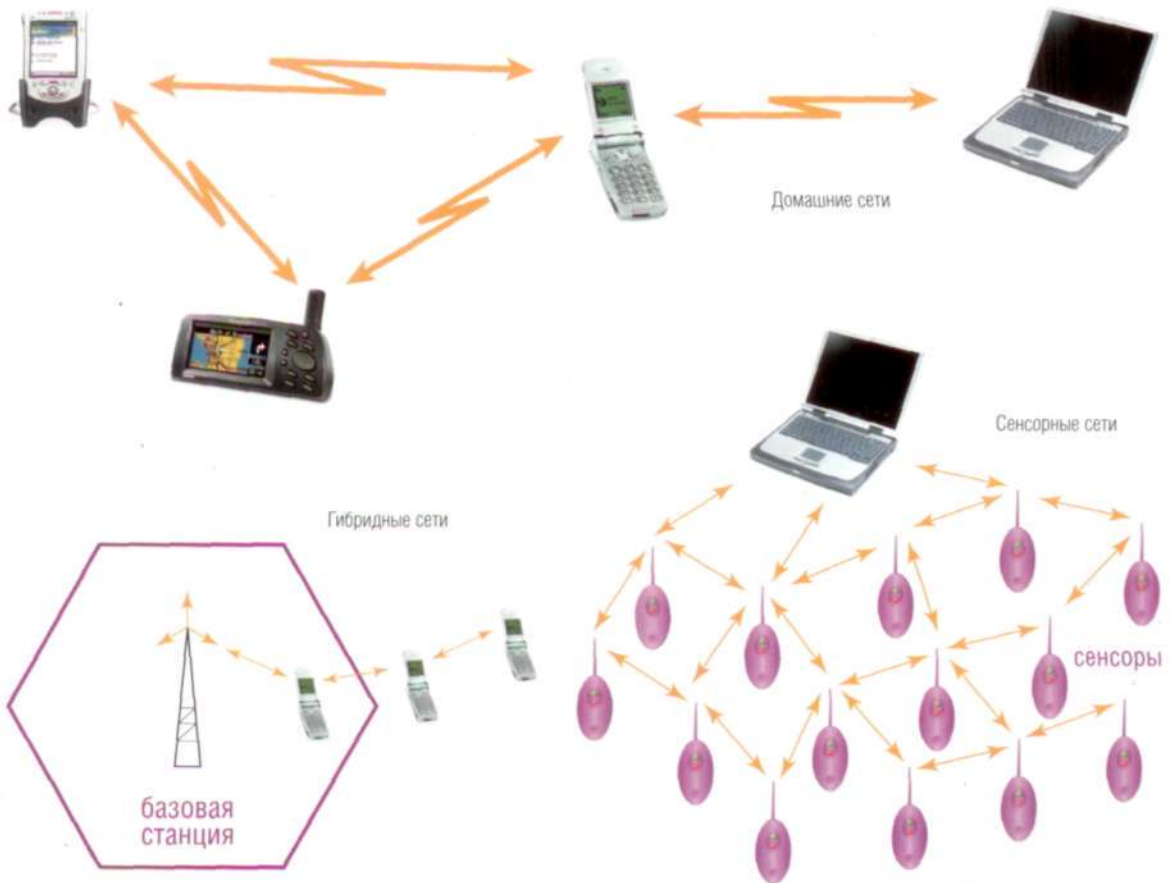
Сегодня в центре внимания научно-исследовательских проектов развитых стран находятся мобильные радиосети (МР), так называемые сети MANET – Mobile Ad-Hoc Networks, предполагающие отсутствие базовых станций (точек доступа) и фиксированных маршрутов передачи информации в беспроводных сетях. Необходимо отметить, что в данных сетях все узлы мобильны и обмениваются информацией непосредственно между собой или ретранслируют передаваемые данные. Под узлом сети понимается радиотерминал (переносной компьютер, персональный секретарь, сенсорное устройство, робот и др.), оснащенный радиомодемом и реализующий функции маршрутизации.

Дословно термин ad-hoc networks переводится как "сети, создаваемые с определенной це-

лью, или сети определенного назначения с произвольной топологией". Классическими примерами МР являются сети радиосвязи военного назначе-

Тактический Интернет – первое реальное использование МР





Примеры построения мобильных радиосетей

ния (тактического уровня) (рис. слева), а также сети обеспечения национальной безопасности в кризисных ситуациях при разрушении фиксированной сетевой инфраструктуры.

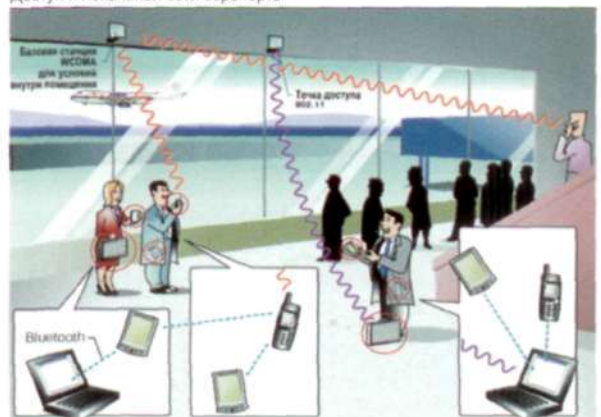
Исследования этих сетей начались еще в 80-е годы с появлением проекта DARPA PRNET (Defense Advanced Research Project Agency Packet Radio Networks), предполагавшего создание сетей радиосвязи с коммутацией пакетов военного назначения. Затем проект трансформировался в программу GloMo (Global Mobile Information System), целью которой стала разработка перспективных цифровых радиосистем FDR (Future Digital Radio), обеспечивающих функционирование тактических Интернет-сетей. Первое же реальное применение военных ad-hoc-сетей во время боевых действий в Ираке продемонстрировало их высокую эффективность.

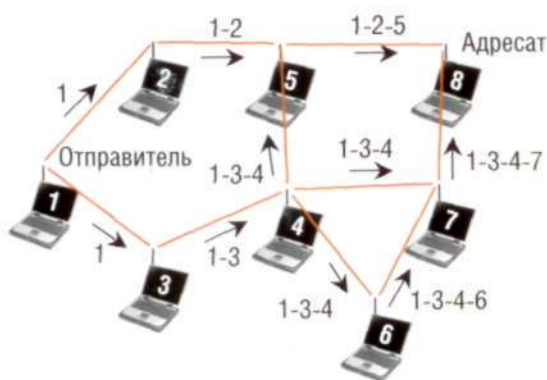
В последние годы возрос интерес и к мирному применению ad-hoc-сетей в различных областях (рис. вверху), таких как проведение спасательных работ в отдаленных районах; организация персональных сетей связи для офиса или дома (Personal Communication Networks); строительство сенсорных беспроводных сетей и гибридных (мо-

бильные/сотовые) сетей, позволяющих увеличить зоны обслуживания абонентов без дополнительных затрат на создание сетевой инфраструктуры.

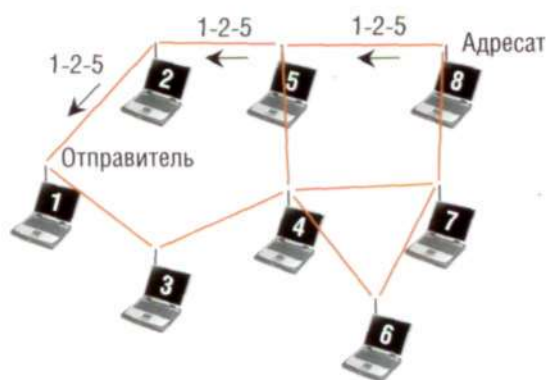
В настоящее время в мобильных радиосетях уже реализуется схема, представленная на рис. ниже, где терминалы пользователей могут поддерживать соединения как друг с другом, так и с информационными системами аэропорта, например, для того чтобы уточнить расписание авиарейсов, узнать номер выхода к самолету и т.п.

Доступ к локальной сети аэропорта





а) Рассылка зондов-запросов



б) Передача зонда-ответа

Этапы создания маршрута зондовым методом (протокол DSR)

Особую коммерческую привлекательность МР приобрели с появлением недорогих беспроводных сетевых решений (стандарт IEEE 802.11 Wireless Ethernet, технологии HiperLan 2, Bluetooth), не требующих связанной инфраструктуры и использующих нелицензионные полосы частот (для большинства стран мира) в диапазонах 2,4 или 5,1 ГГц. Данные

решения обеспечивают радиосвязь между узлами сети в пределах прямой видимости на расстояниях обычно от 10 до 1000 метров и являются основой для построения радио-(беспроводных) сетей.

Основной особенностью МР является динамическая топология: все узлы сети мобильны, в результате чего каналы радиосвязи нестабильны, также они имеют ограниченную дальность связи и пропускную способность (по сравнению со стационарными сетями). Среди других особенностей сетей можно назвать ограниченные энергетические возможности большинства узлов сети (которые оснащены аккумуляторными батареями), значительную их размерность, а также высокую плотность размещения узлов на местности. Характеристики, отличающие мобильные радиосети от сотовых сетей связи, представлены в таблице внизу.

В отличие от традиционных проводных или беспроводных сетей, в мобильных радиосетях большинство или все узлы являются мобильными. Однако базовые требования пользователя по передаче различных типов информации в МР аналогичны требованиям для традиционных сетей, что в свою очередь требует решения новых проблем управления мобильными радиосетями на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем.

### Характеристики беспроводных технологий

Характеристика	Протокол канального уровня			
	IEEE 802.11	HomeRF	HiperLan 2	Bluetooth
Частота (ГГц)	2,4 / 5,1	2,4	5,1	2,4
Расстояние (м)	100...1000	50	100...250	10...100
Скорость передачи в канале (Мбит/с)	1/2/11/54	11	54	0,7...1
Протокол доступа к каналу (MAC)	DFWMAC (CSMA/CA)		TDMA/TDD	Polling/ TDD
Тип управления, организация сети	Децентрализованное, все узлы равноправны		Зоновое (кластеризация сети), централизованное управление ресурсами (Master/Slave) в каждой зоне (пикосети)	
Мобильность узлов	Легко реализуется на сетевом уровне		Затруднена, вызывает необходимость перестройки зон сети	
Пропускная способность сети	Ограничена взаимными помехами и возможными перегрузками		Определяется конфигурацией сети (время реконфигурации сети достаточно большое)	

### Основные отличия сотовых и мобильных радиосетей

Характеристика	Сотовые сети	Мобильные радиосети
Архитектура	Фиксированная сотовая: фиксированные зоны обслуживания, стационарные базовые станции, использование стационарной сети общего пользования	Отсутствие фиксированной инфраструктуры, каждый узел выступает в роли ретранслятора (маршрутизатора) сообщений
Тип топологии	Статическая	Динамическая
Время развертывания	Значительное, необходим этап проектирования (планирование) сети до момента ее использования	Быстрое развертывание, самоорганизация сети, адаптация топологии к условиям функционирования
Тип управления	Централизованное	Децентрализованное
Мобильность	Мобильны только абоненты в пределах зон покрытия	Мобильны все элементы сети
Живучесть	Низкая	Высокая

## Мобильная маршрутизация

Как известно, пропускная способность радиоканала непостоянна и зависит от расстояния между абонентами, мощности передачи, количества соседних узлов и уровня создаваемого ими трафика, применяемого протокола доступа к радиоканалу (случайного или детерминированного). Основные характеристики применяемых протоколов канального уровня приведены в табл. на с.64 слева. Различия в характеристиках определяет области применения МР, построенных на данных технологиях.

Очевидна тесная взаимосвязь канального и сетевого уровней, так как каждый радиоканал может использоваться в нескольких маршрутах передачи информации. Особенности мобильных радиосетей определяют ключевые требования (многие из них носят противоречивый характер) к протоколам маршрутизации: распределенное (децентрализованное) функционирование; минимальная загрузка сети служебной информацией, отсутствие "зацикливания" маршрутов; быстрая сходимости; получение маршрута по мере необходимости; обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; минимизация мощности передатчиков узлов и др.

В настоящее время для использования в МР предложен ряд протоколов маршрутизации, которые по способу построения и поддержания маршрута классифицируются на две основные группы:

- таблично-ориентированные – DSDV (Destination Sequenced Distance Vector), WRP (Wireless Routing Protocol), OLSR (Optimized Link State Routing) и др;
- зондовые – DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector), ABR (Associativity-Based Routing), SSR (Signal Stability Routing) и др.

При использовании таблично-ориентированных методов каждый узел постоянно – на основе периодического обмена содержимым маршрутных таблиц с соседними узлами – строит маршрутную таблицу, содержащую кратчайшие пути (по критерию минимальной стоимости, где под стоимостью может пониматься число ретрансляций, время доставки, затрачиваемая мощность передатчика и др.) ко всем узлам сети.

При зондовой маршрутизации узлы формируют маршрут передачи информации по мере необходимости, путем волновой рассылки по сети служебных пакетов малого объема (зондов-запросов) и сбора зондов-ответов, содержащих информацию о кратчайших маршрутах (по выбранному критерию) передачи информации. Поэтому зондовая маршрутизация всегда предполагает два основ-

## Топология и энергетическая эффективность мобильных радиосетей

Мобильность узлов приводит к разнообразным типам топологий всей сети. Тем не менее сеть должна поддерживать необходимый уровень производительности, которого во многих ситуациях не удастся достичь только за счет функционирования протоколов маршрутизации. В то же время изменение топологии сети может иметь более значительный эффект, в отличие от использования адаптивной маршрутизации.

При этом предполагается, что каждый узел может изменять мощность передачи с определенным шагом дискретизации, а в ближайшем будущем узлы могут быть оснащены секторными направленными антеннами, обладающими возможностями приема/передачи сигнала одновременно в нескольких секторах.

Увеличение мощности передатчиков узлов обуславливает высокую вероятность успешной передачи пакетов, приводит к увеличению скорости передачи в канале, снижению времени доставки пакетов, сокращению объема служебной маршрутной информации вследствие уменьшения диаметра сети. Однако это требует большего расхода энергии батарей и обуславливает высокий уровень взаимных помех, что в итоге приводит к резкому снижению пропускной способности сети.

Уменьшение мощности передатчиков узлов позволяет увеличить пропускную способность сети, снизить расход энергии батарей и соответственно увеличить время функционирования сети. Вместе с тем уменьшение мощности увеличивает время передачи и объем служебного трафика, а также может привести к разделению сети на несвязные компоненты.

Целью управления топологией является перераспределение мощностей передатчиков узлов (и/или диаграмм направленности их антенн) для обеспечения заданной связности сети и выполнения требований маршрутизации сообщений (например, оперативности доставки сообщений между парой "отправитель-адресат").

Таким образом, для повышения эффективности функционирования МР необходимо осуществлять оперативное управление топологией сети (создавать потенциальные маршруты передачи информации) и управление построением и поддержанием маршрутов при полученной топологии.

Электропитание большинства узлов мобильной сети осуществляется от батарей, что влияет на работу центрального процессора, объем и использование памяти, обработку сигналов и входную/выходную мощность приемопередатчика каждого из узлов. Поэтому протоколы различных уровней должны ми-

ных этапа функционирования: создание маршрута и его поддержание в актуальном состоянии.

Далее будут кратко рассмотрены примеры функционирования протоколов маршрутизации для мобильных радиосетей двух вышеуказанных классов.

Протокол DSDV реализован на основе распределенной версии алгоритма Беллмана-Форда (алгоритм вектора-расстояний, Distance Vector Algorithms, DVA). Преимуществом этого протокола является отсутствие закливания маршрутов при самоорганизации сети, он также эффективен для сетей размерностью до 100 узлов при их незначительной мобильности. Однако протокол DSDV не лишен недостатков: не решена проблема сходимости, возможны так называемые "колебания" маршрутов.

Протокол DSR предусматривает два этапа функционирования. На этапе создания маршрута отправитель (узел 1 на рис. на с.64) не имеет маршрута передачи пакетов адресату (узлу 8 на том же рисунке). Для построения маршрута отправитель передает всем узлам сети зонд-запрос, содержащий идентификаторы адресата и отправителя. Узел, принявший зонд-запрос, записывает полученный маршрут (от отправителя к данному узлу) в свой маршрутный кэш (происходит так называемый процесс "обучения возможным маршрутам") и проверяет факт приема зонда ранее.

Если зонд принимался ранее, то он стирается, в противном случае его обработка осуществляется следующим образом:

- если узел не имеет маршрута к адресату, он добавляет свой идентификатор в зонд-запрос и широкоэвещательно передает своим соседним узлам;
- при достижении зондом-запросом адресата (узла 8) от него посылается зонд-ответ с указанием полученного маршрута (1-2-3-5-8).

На этапе поддержания маршрута, если промежуточный узел в маршруте соединения обнаружи-

вает отказ радиоканала, то он посылает зонд-отказ, что инициирует процесс создания нового маршрута, как было описано выше.

Достоинством этого протокола является быстрая адаптация к изменению топологии сети и отсутствие периодической посылки служебной информации, что характерно для табличных методов. К недостаткам можно отнести тот факт, что использование волнового способа передачи на этапе создания маршрута вызывает значительный служебный трафик в сети при наличии большого числа активных пар "отправитель-адресат", а также задержки в построении маршрутов.

Общая сравнительная характеристика основных классов протоколов маршрутизации для МР представлена в таблице внизу.

Таким образом, в настоящее время для использования в МР предложено большое количество протоколов маршрутизации. Два из них – DSR и AODV – представлены к стандартизации рабочей исследовательской группой IETF (Internet Engineering Task Force – [www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html](http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html)).

Каждый из этих протоколов маршрутизации обладает достоинствами и недостатками, расходует различное количество временных, связанных и вычислительных ресурсов сети на построение и поддержание маршрута, имеет свои особенности реализации. Поэтому выбор конкретного протокола маршрутизации будет определяться характеристиками конкретной сети (число узлов, пропускная способность радиоканалов, мощности передатчиков и др.) и условиями ее функционирования (динамика изменения топологии и нагрузки, интенсивность отказов элементов сети и т.д.).

Также надо отметить, что в процессе передачи для МР характерны потери части пакетов, значительные временные задержки из-за необходимости построения (перестройки) маршрутов. Все это требует усовершенствования механизмов

**Характеристики протоколов маршрутизации для МР**

Характеристика	Протоколы маршрутизации	
	Зондовые	Таблично-ориентированные
Способ построения маршрута(ов) передачи информации	По мере необходимости от отправителя к адресату на основе волновой рассылки зондов-запросов и сбора зондов-ответов	Каждый узел – ко всем адресатам сети на основе периодического обмена содержимым маршрутных таблиц и их корректировки с соседними узлами
Периодическая корректировка маршрутных таблиц	Не требуется	Требуется
Объем служебного трафика: – высокая динамика изменения топологии; – низкая динамика изменения топологии	Меньше Больше	Больше Меньше
Основные достоинства	Построение маршрутов по мере необходимости	Постоянное наличие маршрутов передачи
Основные недостатки	Задержка в построении маршрута, волновой способ передачи зондов-запросов	Медленная сходимость и зависимость от размерности сети, возможность закливания маршрутов

функционирования протоколов транспортного уровня (в частности, TCP). Для этого процесс управления передачей пакетов по маршруту предлагается разбить на несколько участков, с введением управления на каждом из них.

Далее будут рассмотрены проблемы безопасности, которые в последнее время достаточно актуальны в радиосетях, в том числе мобильных.

## **Проблемы радиобезопасности**

Узлы MP функционируют в общей радиосреде и поэтому уязвимы для потенциальных атак. Для несанкционированного подключения злоумышленнику достаточно оказаться в зоне радиовидимости и иметь оборудование того же типа, на базе которого построена сеть. Результатами атак на радиосети могут стать как нарушение их физической целостности, прослушивание (сканирование) трафика, так и полная дезорганизация их работы.

С точки зрения криптографии MP не создают никаких новых проблем. Требования по части аутентификации, конфиденциальности, целостности и неопровержимости являются аналогичными

## **Топология и энергетическая эффективность мобильных радиосетей**

с.65 ▶

минимизировать энергопотребление. На физическом уровне это реализуется за счет уменьшения мощности сигнала между соседними узлами, на канальном уровне – за счет энергосберегающих протоколов, предполагающих следующие режимы:

- режим "пассивного" квитиования – узел, передавший пакет, "слышит" его ретрансляцию соседом;
- режим "сна" – узел, обнаружив, что передаваемый пакет предназначен не ему, отключается на время передачи данного пакета.

Соотношение расходуемой мощности в зависимости от режимов работы узла – "сон"/поиск/прием/передача – для современных беспроводных карт (например, для Lucent IEEE 802.11 WarePC Card) составляет 0,025:1;1,2:1,6 Вт.

На сетевом уровне уменьшение потребляемой мощности реализуется маршрутизацией со следующими метриками (параметрами) выбора маршрутов: мощность передатчика узла и оставшаяся емкость аккумуляторной батареи. Это позволяет выбирать маршруты с минимальной суммарной мощностью передачи и максимально сохранять емкость батарей узлов радиосети.

для сетей связи общего пользования. При этом центральной проблемой остается создание доверительных отношений между узлами без достоверной сертификации третьей стороной.

Распределенный режим функционирования сети не может быть реализован без обеспечения безопасной маршрутизации. Обеспечение в МР требований безопасности, например, для методов зондовой маршрутизации на этапе построения маршрута, включает в себя две составляющие:

- аутентификацию отправителем адресата и проверку отправителем достижимости адресата;
- нахождение безопасного кратчайшего маршрута.

Атаки, направленные на протоколы маршрутизации, можно классифицировать как внешние и внутренние, активные и пассивные. Защита от внешних атак включает в себя шифрование передаваемой маршрутной информации и обеспечение различных сервисов безопасности.

Для защиты от внутренних атак (предполагается возможность существования в сети скомпрометированных узлов) пока не существует эффективных решений. Способы защиты от внутренних атак предполагают:

- разделение информации на части, ее шифрование и передачу по нескольким каналам или независимым маршрутам. Этот способ должен предполагать возможность построения нескольких независимых маршрутов передачи информации;
- обнаружение скомпрометированных узлов и исключение их из процесса маршрутизации. Для этого каждый узел сети контролирует совокупность параметров соседних узлов и делает вывод об их "поведении". Выбор лучшего маршрута осуществляется в зависимости от истории "поведения" соседей;
- применение каждым узлом сети системы обнаружения вторжения IDS (Intrusion Detection System) для идентификации известных типов атак по содержащимся в базе данных IDS сигнатурам атак.

Пассивные атаки осуществляются путем прослушивания радиозэфира и сбора маршрутной информации с целью вскрытия топологии сети и способов ее адресации. Они не нарушают нормальную работу протоколов маршрутизации, но их почти невозможно обнаружить.

Активные атаки направлены на частичную или полную дезорганизацию работы сети путем ввода в сеть повторной (устаревшей) или ложной (измененной) маршрутной информации. Например, атака типа "отказ в обслуживании" (DoS – Denial of Service) может быть легко реализована модификацией одного или нескольких полей

маршрутного зонда: адреса отправителя (spoofing), числа ретрансляций, номера сообщения и самого маршрута передачи.

Результатами активных атак могут быть: перенаправление маршрутов (и, соответственно, трафика), зацикливание маршрутов, создание перегрузки в узлах сети, переполнение маршрутных таблиц, имитация разделения сети на отдельные подсети, увеличение времени доставки сообщений и т. д. Защита от активных атак должна предусматривать аутентификацию и целостность маршрутной информации.

В любом случае нужно понимать, что абсолютную безопасность не может гарантировать ни одна существующая технология, а решение этих проблем лежит в пределах разумного.

## Сети будущего

В современных сетях сотовой связи мобильность пользователей поддерживается в основном средствами переадресации с использованием технологии роуминга – при перемещении пользователя вне своей сети все поступающие к нему вызовы будут переадресованы в гостевую сеть через его собственную. Такие же принципы переадресации применяются в сетях сотовой связи на базе IP-протоколов.

Следует отметить, что данный подход неприемлем в МР, поскольку все узлы в МР могут перемещаться, и идея заключается именно в использовании устройств, которые одновременно служат как маршрутизаторами, так и окончательными узлами.

Следовательно, в МР управление мобильностью будет осуществляться непосредственно протоколами маршрутизации. Так, если пользователю МР будет необходим доступ к фиксированной сети (например, к Интернету), это потребует наличие функций управления, которые позволят поддерживать доступ к фиксированной сети для терминалов, находящихся от нее на расстоянии нескольких ретрансляций.

Таким образом, в ближайшем будущем следует ожидать появления на рынке значительного количества технологических решений, способствующих внедрению мобильных беспроводных сетей различного назначения, создания сенсорных и гибридных (мобильных/сотовых) сетей связи, а с ростом размерности таких сетей – появления систем, альтернативных сотовым сетям связи. Тем более, что к реализации данных проектов подключились такие сетевые гиганты, как Cisco, Ericsson и др.

**Валерий Романюк**

доктор технических наук

romanjuk@i.com.ua