

С.Г. БУНИН, А.П. ВОЙТЕР, М.Е. ИЛЬЧЕНКО, В.А. РОМАНИЮК

**САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ  
РАДИОСЕТИ  
СО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ  
СИГНАЛАМИ**



Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. — К.: НПП "Издательство "Наукова думка" НАН Украины". — 444 с.: ил.

В монографии описаны принципы, особенности построения и функционирования нового класса сетей — самоорганизующихся стационарных и мобильных сетей радиосвязи (Ad Hoc и MANET). Рассматривается возможность использования в таких сетях импульсных сверхширокополосных сигналов. Приведены основные свойства, параметры и примеры возможной реализации самоорганизующихся радиосетей (военного, промышленного и домашнего назначения). Изложены теоретические основы и примеры решения задач управления радиосетями (процедуры доступа в радиоканал, маршрутизация и ретрансляция пакетов, интеллектуализация управления сетями) на канальном сетевом и прикладном уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем. Рассмотрены принципы, примеры построения и реализации приемопередающих устройств сверхширокополосной радиосвязи.

Для научных работников и специалистов в области радиосвязи, аспирантов и студентов, изучающих соответствующие курсы в высших учебных заведениях.

У монографії описано принципи, особливості побудови і функціонування нового класу мереж — стаціонарних і мобільних мереж радіозв'язку із самоорганізацією (Ad Hoc і MANET). Розглядається можливість використання в таких мережах імпульсних надширокосмугових сигналів. Наведено основні властивості, параметри та приклади можливої реалізації радіомереж із самоорганізацією (військового, промислового та домашнього призначення). Викладено теоретичні основи та приклади розв'язання задач управління радіомережами (процедури доступу в радіоканал, маршрутизація і ретрансляція пакетів, інтелектуалізація управління мережами) на каналному, мережевому та прикладному рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Розглянуто принципи, приклади побудови і реалізації прийнятно-передавальних пристроїв надширокосмугового радіозв'язку.

Для науковців і фахівців у галузі радіозв'язку, аспірантів і студентів, що вивчають відповідні курси у вищих навчальних закладах.

Principles, features of construction and functioning of a new class of networks — self organized stationary and mobile radio networks (Ad Hoc and MANET) are described in the book. Usage of impulse ultra wide band signals (IR-UWB) in such networks is examined. Basic properties, parameters and examples of possible realizations of self organized radio networks (military, industrial and domestic) are shown. Theoretical bases and examples of management decisions in the radio networks (procedures of multiple access in a radio channel, routing and packet relays, artificial intelligence of the network management) are expounded on physical, network and application levels of the open systems interconnection (OSI) model. Principles, examples of construction and realization of ultra wide band radio transceivers are considered.

This book can be useful to researchers and specialists in fields of radio communications, to the graduate and distance learning students in colleges and universities.

**Рецензенты:**

академик НАН Украины А.В. Палагин  
доктор технических наук, профессор Л.Н. Беркман

Научно-издательский отдел физико-математической и технической литературы

Редактор В.В. Верощка

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	8
Список литературы .....	15
<b>ГЛАВА 1. Основные свойства, параметры и примеры самоорганизующихся радиосетей</b> .....	<b>17</b>
1.1. Классификация, параметры самоорганизующихся сетей .....	17
1.2. Сферы применения самоорганизующихся сетей .....	18
1.2.1. Сети радиосвязи тактического звена управления .....	19
1.2.2. Меш-сети .....	26
1.2.3. Сенсорные сети .....	34
1.2.4. Автомобильные сети .....	39
1.2.5. Гибридные сети .....	40
1.3. Преимущества и перспективы самоорганизующихся сетей .....	41
1.4. Выводы .....	45
Список литературы .....	45
<b>ГЛАВА 2. Маршрутизация в самоорганизующихся радиосетях</b> .....	<b>48</b>
2.1 Анализ методов маршрутизации .....	48
2.1.1. Анализ методов маршрутизации в стационарных сетях .....	48
2.1.2. Схема системного анализа и синтеза методов маршрутизации в СРС .....	57
2.2. Методы однопользовательской маршрутизации информационных потоков в сетях с динамической топологией .....	64
2.2.1. Таблично-ориентированные методы маршрутизации .....	65
2.2.2. Оценка эффективности таблично-ориентированных методов маршрутизации .....	70
2.2.3. Зондовые методы маршрутизации .....	72
2.2.4. Оценка эффективности зондовых методов маршрутизации .....	75
2.2.5. Гибридный метод маршрутизации .....	80
2.3. Методы групповой маршрутизации .....	84
2.3.1. Анализ методов групповой маршрутизации .....	84
2.3.2. Оценка эффективности методов групповой маршрутизации .....	90
2.4. Волновые алгоритмы передачи информации .....	94
2.5. Методы иерархической маршрутизации в радиосетях большой размерности .....	98
2.5.1. Алгоритмы динамического создания и поддержания зон сети .....	100
2.5.2. Динамическая адресация абонентов сети .....	104
2.5.3. Маршрутизация пакетов .....	106
2.5.4. Оценка эффективности методов иерархической маршрутизации .....	107
2.6. Многопутевая маршрутизация .....	108
2.7. Маршрутизация интегрального трафика .....	112
2.8. Асимметричная маршрутизация .....	114
2.9. Безопасность маршрутизации .....	118
2.10. Имитационное моделирование методов маршрутизации .....	120

2.11. Предложения по реализации методов маршрутизации .....	125
2.12. Выводы .....	131
Список литературы .....	133
<b>ГЛАВА 3. Ретрансляция в самоорганизующихся сетях .....</b>	<b>137</b>
3.1. Ретрансляция в сетях Ad Hoc .....	137
3.2. Одночастотные дуплексные ретрансляторы и сети на их основе .....	138
3.3. Сравнительный анализ эффективности применения различных типов ретрансляторов .....	152
3.4. Выводы .....	155
Список литературы .....	156
<b>ГЛАВА 4. Управление доступом к радиоканалу .....</b>	<b>157</b>
4.1. Принципы проектирования MAC уровня .....	157
4.2. Методы и средства конкурентного использования радиоканала .....	163
4.3. MAC-уровень в СРС .....	185
4.3.1. Математическая модель влияния скрытых абонентов .....	186
4.3.2. Методы и средства компенсации влияния скрытых абонентов .....	190
4.4. Самоорганизация на MAC-уровне .....	194
4.4.1. Адаптивное управление задержкой передачи .....	195
4.4.2. Управление жесткостью протокола МДКН .....	199
4.4.3. Влияние длины пакета на пропускную способность MAC-уровня .....	203
4.4.4. Адаптивное управление переменной длиной пакетов .....	207
4.5. Методы и средства локализации конфликтов .....	216
4.5.1. Структурная локализация конфликтов .....	217
4.5.2. Временная локализация конфликтов .....	220
4.5.3. Динамическая локализация конфликтов .....	222
4.6. Приоритетный доступ на MAC-уровне .....	227
4.6.1. Временной приоритетный доступ .....	227
4.6.2. Двухпротокольный приоритетный доступ .....	229
4.7. MAC-уровень для сегментов сети с большим интервалом уязвимости .....	234
4.7.1. Протокол MAC-уровня для спутниковых радиосетей .....	235
4.7.2. Протоколы MAC-уровня для сетей регионального масштаба .....	239
4.8. Выводы .....	246
Список литературы .....	248
<b>ГЛАВА 5. Интеллектуализация управления самоорганизующимися радиосетями .....</b>	<b>255</b>
5.1. Особенности управления самоорганизующимися сетями .....	255
5.2. Основные подходы по интеллектуализации управления радиосетями .....	259
5.3. Этапы цикла оперативного управления .....	262
5.4. Функциональная модель системы управления .....	267
5.5. Управление качеством обслуживания .....	274
5.5.1. Особенности управления качеством обслуживания в самоорганизующихся радиосетях .....	274
5.5.2. Методы QoS-управления на физическом уровне .....	276
5.5.3. Методы QoS-управления на канальном уровне .....	276

5.5.4. Методы QoS-управления на сетевом уровне .....	281
5.5.5. Методы QoS-управления на транспортном уровне .....	284
5.5.6. Методы QoS-управления на прикладном уровне .....	285
5.6. Интеллектуальный метод маршрутизации в самоорганизующихся сетях.....	287
5.7. Выводы .....	300
Список литературы .....	301
<b>ГЛАВА 6. Импульсные сверхширокополосные сигналы .....</b>	<b>305</b>
6.1. Общая характеристика импульсных сверхширокополосных сигналов .....	305
6.2. Свойства импульсных сверхширокополосных сигналов .....	309
6.3. Практическое применение IR-UWB-сигналов в настоящее время .....	316
6.4. Некоторые способы увеличения дальности связи при существующих ограничениях .....	322
6.5. Принципы построения устройств радиосвязи на импульсных сверхширокополосных сигналах .....	323
6.5.1. Передатчики импульсных сверхширокополосных сигналов .....	323
6.5.2. Приемники импульсных сверхширокополосных сигналов .....	326
6.5.3. Сверхширокополосные антенны .....	342
6.5.4. Ретрансляторы IR-UWB-сигналов .....	345
6.6. Энергетика каналов связи с импульсными сверхширокополосными сигналами.....	347
6.7. Выводы .....	363
Список литературы .....	363
<b>ГЛАВА 7. Сети на основе импульсных сверхширокополосных сигналов .....</b>	<b>365</b>
7.1. MAC-уровень I-UWB сетей .....	365
7.1.1. Особенности проектирования I-UWB сетей .....	365
7.1.2. Классификация MAC-протоколов для UWB сетей .....	368
7.1.3. Протокол контролируемого доступа на основе CDMA .....	370
7.1.4. Превентивный и адаптивный MAC-протокол .....	376
7.1.5. Протокол MAC на основе CDMA и кодового брокера .....	387
7.1.6. Многоканальный протокол множественного доступа PSMA .....	397
7.1.7. Протокол множественного доступа с сигналом "занято" BSMA .....	401
7.1.8. Многополосный MAC-протокол .....	405
7.1.9. MAC-протокол с управлением параметрами связи .....	413
7.1.10. Децентрализованный MAC-протокол с динамическим канальным кодированием .....	419
7.2. Координатная маршрутизация в I-UWB сетях .....	424
7.3. Выводы .....	433
Список литературы .....	435
<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>438</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга посвящена проблеме построения самоорганизующихся безинфраструктурных стационарных (Ad Hoc) и мобильных (MANET) радиосетей с элементами искусственного интеллекта. Рассмотрены возможности и перспективы использования в этих радиосетях импульсных сверхширокополосных сигналов (I-UWB), позволяющих улучшить их пропускную способность.

Монография состоит из введения и семи глав.

Во *введении* дается определение самоорганизующихся радиосетей (СРС), история их возникновения и эволюция, а также выделяются особенности архитектуры и некоторые нерешенные проблемы создания сетей данного класса.

В *первой главе* рассмотрены классификация, параметры и сферы применения СРС.

*Вторая глава* посвящена проблеме маршрутизации в самоорганизующихся сетях. Выполнен сравнительный анализ различных классов методов (протоколов) маршрутизации – табличных, зондовых, гибридных – и предложена методика оценки их эффективности. Рассмотрена совокупность методов и алгоритмов передачи многоадресной информации – методы групповой маршрутизации и волновые алгоритмы передачи информации в СРС.

Для реальных условий функционирования СРС предложена совокупность многопараметрических методов, обеспечивающих пользовательскую оптимизацию: методы многопутевой маршрутизации, метод асимметричной маршрутизации (при условии наличия неоднородных радиоканалов), а также метод маршрутизации интегрального трафика (позволяет обеспечить построение и поддержание маршрутов заданного качества для передачи различных типов информации).

Для СРС большой размерности (сотни и тысячи узлов) рассмотрена иерархическая маршрутизация. Предложены новые критерии и алгоритм кластеризации сети, способы внутризональной и межзональной маршрутизации сообщений.

Предложен новый подход (“активная” маршрутизация), предполагающий функционирование в сети множества методов маршрутизации, динамическое формирование метрик выбора маршрута, управление топологией сети как составной частью маршрутизации, интеллектуализацию процессов принятия решения по маршрутизации.

В *третьей главе* изложены особенности ретрансляции в сетях Ad Hoc, подробно описаны теоретические основы и практическая реализация одночастотного дуплексного ретранслятора, а также приведены теоретические исследования эффективности различных способов ретрансляции.

В *четвертой главе* рассмотрены методы и принципы проектирования средств управления доступом к радиоканалу, учитывающие специфику СРС. Предложен ряд новых протоколов управления доступом, обеспечивающих самоорганизацию и компенсирующих влияние скрытых абонентов, осуществляющих адаптивное управление задержкой передачи и пропускной способности радиоканала путем вариации длины пакетов данных, а также обеспечивающих приоритеты в условиях конкурентного доступа. Проанализированы методы и средства локализации конфликтов в СРС. Предложены методы приоритетного обслуживания в условиях конкурентного доступа к радиоканалу. Для СРС с орбитальными ретрансляторами дан

новый протокол доступа с адаптивной загрузкой канала, обеспечивающий существенное превышение приведенной средней скорости передачи по сравнению с протоколом асинхронного резервирования.

В *пятой главе* рассмотрена методология решения проблемы управления самоорганизующимися радиосетями. Для этого произведена декомпозиция проблемы (по функциям и уровням эталонной модели) на задачи, определены требования к методам управления в СРС и предложены основные направления решения задач анализа и синтеза управления данными сетями.

Показано, что обеспечение заданного качества обслуживания в СРС должно осуществляться по функциям с их реализацией на всех уровнях эталонной модели под управлением выделенной QoS-подсистемы, основным элементом которой является база знаний.

Показано, что интеллектуализация системы управления СРС позволит оптимизировать процесс управления данной сетью на основе анализа и учета ситуации, сложившейся в сети (информационном направлении), а также требований по передаче определенных типов трафика; минимизировать ошибки, вызванные человеческим фактором в ходе принятия правильного решения по управлению сети; уменьшить затраты времени на сбор и анализ служебной информации о состоянии сети и значительно сократить объемы этой информации.

Предложен новый интеллектуальный метод маршрутизации для СРС, который в отличие от существующих методов зондовой маршрутизации предусматривает введение дополнительных функций маршрутизации и интеллектуализацию процесса принятия решений по выбору маршрутов передачи данных на основе использования аппарата нечеткой логики.

*Шестая глава* посвящена характеристикам сверхширокополосных импульсных сигналов и их применению в системах радиосвязи, в частности в радиосетях Ad Hoc и MANET. Эти сигналы представляют собой дискретные потоки сверхкоротких импульсов, спектр частот которых может простирается от единиц герц до десятков гигагерц. В отличие от традиционных радиоустройств с сигналами на основе синусоидальных несущих они могут генерироваться и приниматься цифровыми устройствами с малой потребляемой мощностью и небольшими габаритами.

В *седьмой главе* рассмотрены специальные методы и средства управления доступом к радиоканалу и методам маршрутизации в самоорганизующихся сетях на основе импульсных сверхширокополосных сигналов. Уникальные свойства таких сигналов практически исключают возможность прямого использования известных протоколов управления доступом к радиоканалу, что требует разработки принципиально новых подходов в их проектировании. В главе дана классификация протоколов управления доступом для сетей с импульсными сверхширокополосными сигналами, приведены примеры их реализации и сравнительные показатели их эффективности. Рассмотрена координатная маршрутизация, использующая способность импульсных сверхширокополосных сигналов определять координаты абонентов в сети с высокой точностью и позволяющая существенно уменьшить объем служебного трафика при значительной динамике топологии сети, что в итоге увеличивает пропускную способность сети и снижает задержку передачи пакетов.

В монографии обобщен опыт работы авторов в течение последних лет по решению научно-технических проблем построения СРС.

## Введение

Главной тенденцией развития будущих систем связи является мобильность. Мобильную связь, с точки зрения пользователя, можно представить в виде нескольких сферических уровней. Такая концепция была предложена в 2001 г. в проекте IST WSI и далее развита в "Книге новых концепций" Всемирного форума по исследованию беспроводных технологий – WWRF [1].

На первом уровне пользователь через системы беспроводной передачи на короткие расстояния объединяет в персональную сеть (PAN) все устройства, которые он носит с собой (мобильный телефон, фотоаппарат, часы и т. д), на втором уровне он соединяется с устройствами в его ближайшем окружении (с телевизором, персональным компьютером, холодильником и др.) – локальная радиосеть (WLAN). Третий уровень обеспечивает непосредственную связь с ближайшими партнерами – другими ближними пользователями, своими транспортными средствами, системой охраны и т.п. Пользователи могут взаимодействовать между собой и/или обмениваться данными с объектами этого уровня.

На четвертом уровне для организации глобального покрытия используются различные системы мобильной связи и беспроводного доступа, сети кабельной фиксированной связи, спутниковые системы, системы на высотных платформах. Главная услуга этих сетей – осуществление доступа к современным глобальным сетям, в частности к сети Интернет, и предоставление соответствующего уровня поддержки для различных терминалов.

Одним из вариантов реализации систем четвертого уровня может быть интегрированная сеть мобильной, беспроводной и фиксированной связи [1]. При дальнейшем развитии взаимосвязей (пятый уровень) сообщения, передаваемые по радиointерфейсам, будут отнесены к приложениям. Все указанные уровни на шестом уровне будут окружены "КиберПространством", где пользователь сможет быть в контакте со всеми своими корреспондентами, базами знаний, средствами телеметрии и управления и т.д., т.е. со своим кругом общения, услугами и транзакциями (рис. 1).

Такая концепция построения телекоммуникационных сетей, когда в центре находится пользователь, является движущей силой для создания множества услуг и приложений, организуемых через различные системы доступа и дальнейшего развития телекоммуникаций. "Пользователецентричный" подход даст людям возможность общения с кем угодно "в любом месте, в любое время". Новые системы будут удовлетворять потребности пользователей в различных приложениях. Однако дальнейшее развитие будет зависеть от ряда факторов и взаимосвязи между ними, а именно от спроса на услуги, интересов пользователей, моделей тарификации и оплаты за услуги, доступности частотного спектра для новых систем, уровня радиопо-



крытия, от экономических условий на различных рынках. В свою очередь все эти факторы складываются в сложную цепочку технических, экономических, социальных, политических и правовых условий, которые должны быть гармонизированы в рамках мирового сообщества, прежде всего в рамках действующих организаций, таких как, Международный союз электросвязи (ITU) и партнерские проекты 3GPP и 3GPP2 [1].

В рассматриваемой концепции огромная роль принадлежит самоорганизующимся радиосетям. Самоорганизующиеся радиосети предполагают возможность организации беспроводной сети без участия человека или с его минимальным участием. Данная архитектура сети получила название Ad Hoc, что в данном случае означает "случайная, спонтанная" или "специально созданная для определенных целей" [1–3]. Основой для создания таких сетей является высокий уровень "интеллектуальности" современных радиотерминалов, содержащих кроме приемопередающих блоков достаточно производительные вычислительные средства – процессор, память большой емкости, что позволяет реализовывать сложные алгоритмы.

Сети Ad Hoc состоят из беспроводных узлов. Под узлом сети понимается беспроводной коммуникатор (переносный компьютер, персональный секретарь, транспортное средство, сенсорное устройство, робот и т.п.), оснащенный радиомодемом. Узлы связаны друг с другом в пределах взаимной радиовидимости, определяемой параметрами радиопередающих устройств, рельефом местности и условиями распространения радиоволн. Отличительной особенностью каждого узла является его способность выполнять функции как *хоста*, т.е. источника и приемника информации, так и *маршрутизатора* информационных и служебных пакетов других абонентов радиосети.

Узлы сети могут быть как стационарными, так и мобильными, однородными или разнородными (отличающиеся мощностью передатчика, емкостью своих батарей питания, производительностью процессоров и т.д.), а также могут размещаться на местности или в пространстве и случайным, и детерминированным способом. При этом процесс передачи информации в данных сетях осуществляется без какого-либо центра управления. Это означает, что каждый узел должен самостоятельно выполнять определенный набор функций управления передачей информации по сети. *Отсутствие постоянной инфраструктуры и децентрализованность управления* – характерные черты самоорганизующихся радиосетей.

Сферами применения сетей Ad Hoc и MANET являются, в первую очередь, сети связи военного назначения тактического уровня, а также сети, развертываемые в условиях чрезвычайных ситуаций и природных катаклизмов.

Гражданскими сферами применения являются: домашние сети и сети предприятий, сенсорные (телеметрические) сети различного назначения, сети контроля и диспетчеризации транспортных средств, сети, создаваемые в удаленных районах, где отсутствует стационарная инфраструктура (сельская местность, пустыни, Арктика и Антарктика, тундра, тайга и т.п.).

Характерными особенностями данных сетей (в отличие от сетей со стационарной инфраструктурой) являются следующие признаки:

1. *Изменяемое количество узлов и площадь покрытия сетью.* Количество узлов сети может варьироваться от десятков до десятков или сотен тысяч узлов. В зависимости от количества узлов, мощности их передатчиков и используемых частот географическое пространство покрытия сетью может меняться в широких пределах.

2. *Мобильность и стационарность узлов.* Стационарные Ad Hoc сети сохраняют неизменность местоположения узлов, но предполагают их произвольное включение в сеть и выключение из сети. Мобильные самоорганизующиеся радиосети MANET (Mobile Ad Hoc Networks) предусматривают возможность перемещения любого узла сети.

3. *Случайность топологии сети, ее неоднородность и динамичность изменения.* Поскольку абоненты сетей могут быть мобильными, то топология сети может постоянно меняться. Кроме того, каждый узел может иметь различные связные и вычислительные ресурсы – иметь разную мощность передатчика, иметь возможность изменять уровень мощности передатчика или диаграмму направленности антенны, быть оснащенный аккумуляторными батареями различной емкости.

4. *Принцип организации передачи информации – коммутация пакетов с использованием многоскачковой маршрутизации.* Этот принцип заключается в том, что каждый узел сети, будучи передатчиком и приемником “собственной” информации, выступает в качестве ретранслятора и маршрутизатора пакетов других абонентов сети. Под маршрутизацией понимается направление пакетов на определенные адреса или ретрансляция сигналов в определенных направлениях.

5. *Децентрализованный тип управления.* Такое управление предполагает автономность узлов в принятии решений по организации передач по определенным маршрутам. Иными словами, в сети отсутствует какая-либо фиксированная инфраструктура для передачи служебной информации или иного вида централизованного управления (в отличие от обычных телекоммуникационных сетей с системами управления [4, 5]). Каждый узел определяет маршрут передачи – последовательность узлов-ретрансляторов на основе предварительного или оперативного сбора информации о состоянии сети и связности ее абонентов в соответствии с *протоколами маршрутизации*, специально разработанными для самоорганизующихся сетей.

6. *Динамичность изменения связности при движении узлов и/или включении/выключении узлов в сеть.* Это требует контроля за прохождением пакетов по сети, изменения маршрутов пакетов при нарушенной связности, а также восстановления передачи сообщений с момента потери связности. Такой характер работы сетей приводит к изменению качества обслуживания сетью (задержка и потеря пакетов, полная потеря связности). Поэтому в самоорганизующихся сетях должны быть предусмотрены механизмы поддержания качества обслуживания за счет, например, передачи пакетов по многим маршрутам, коллективной ретрансляции пакетов.

7. *Многоканальность сетей.* Каждый узел может быть оборудован одним или несколькими приемопередающими устройствами, работающими в различных час-

тотных полосах. Таким образом, кроме коммутации пакетов в одном частотном канале возможна коммутация каналов.

8. *Масштабируемость.* При масштабируемости сеть легко наращивается и изменяет количество своих узлов. Увеличение размерности сети до сотен и тысяч узлов может потребовать введения локализации управления, т.е. разделение всей сети на кластеры с собственными протоколами маршрутизации и межкластерной ретрансляцией через узлы-шлюзы. Возможно и введение иерархии в сети, когда на основе узлов, имеющих достаточные ресурсы или хорошее месторасположение (например, на вершинах холмов), осуществляется прямая связь между конечными абонентами или кластерами через минимальное количество ретрансляций.

9. *Ограниченность ресурсов узлов сети.* Узел сети имеет ограниченные ресурсы (емкость памяти, производительность процессора, мощность передатчика и энергоемкость батарей). Энергия батарей расходуется как на коммуникационную (прием, передача, обработка сообщений и др.), так и на вычислительную (процессор) составляющие. Экономия энергии батарей питания – одна из задач разработчиков терминалов и протоколов взаимодействия.

10. *Ограниченная безопасность.* Широковещательная природа радиоканала позволяет злоумышленнику (противнику) осуществлять прослушивание передач узлов, анализировать сетевой трафик и нарушать или ухудшать работу сети, ставить активные и пассивные помехи. Поэтому в сети должны быть предприняты меры, минимизирующие или исключаящие возможное предумышленное отрицательное влияние на работу сетей. Такой мерой может быть применение на физическом уровне сложных радиосигналов, например сверхширокополосных.

Свою историю самоорганизующиеся радиосети берут с научных разработок начала 70-х годов прошлого столетия с момента внедрения принципа коммутации пакетов в телекоммуникационные технологии. Так, в 70-х годах проект ALOHA Гавайского университета был первой демонстрацией возможной пакетной широковещательной передачи в стационарной радиосети с одним ретранслятором [7]. В Киеве в конце 70-х годов авторами настоящей книги С.Г. Буниным и А.П. Войтемом была разработана и создана первая в Европе пакетная радиосеть "Дискрет". Эта сеть была построена на базе стационарных ретрансляторов, вокруг которых располагались абонентские терминалы, взаимодействующие между собой через эти ретрансляторы. Она была предназначена для пакетного обмена данными между вычислительными центрами научных учреждений города. Подобные сети были внедрены в ряде городов СССР. В работе [8] подробно изложена архитектура пакетной радиосети "Дискрет", приведены примеры реализации и представлены аналитические зависимости расчета основных параметров сети. В книге [9] рассмотрены принципы построения радиосетей и передачи информации с коммутацией пакетов, которые развиваются стремительными темпами в связи с практической реализацией сотовых систем телекоммуникаций, мобильного доступа к сети Интернет и ведомственным сетям.

В 1972 г. Министерство обороны США (DARPA, U.S. Defense Research Agency) спонсировало проект создания пакетной радиосети PRNET (Packet Radio Network) [10–12], предназначенной для обеспечения пакетной передачи данных на поле боя в тактическом звене управления. Данная экспериментальная узкополосная радиосеть небольшой размерности (до 50 мобильных узлов) использовала протокол множественного доступа с контролем несущей, применяла многоскачковую маршрутизацию с использованием алгоритмов маршрутизации, применяемых в стационарных сетях связи, и обеспечивала передачу данных со скоростями до 16 Кб/с.

Необходимо отметить, что в эти годы аналогичные научные разработки по созданию пакетных радиосетей проводились и в СССР при создании транспортной среды (радиосетей с коммутацией сообщений) для полевого комплекса средств автоматизированного управления войсками тактического звена управления “Маневр”.

В 80-х годах прошлого века в США появились первые образцы тактических пакетных радиосетей DARPA PRNET и CNR (Combat Net Radio) [10–12], а в СССР – тактические системы радиосвязи с использованием аппаратуры передачи данных “Базальт” и позднее “Редут”. Данные пакетные радиосети поля боя (десятки транспортных единиц) использовали простейшие методы множественного доступа (случайный и с контролем несущей), таблично-ориентированный метод маршрутизации на основе алгоритма Беллмана–Форда (сеть PRNET) или фиксированную маршрутизацию (аппаратуру передачи данных “Базальт”, “Редут”). Аппаратура узлов сети была довольно громоздкой, отличалась низкой надежностью и значительной энергозатратностью. В данных сетях каждый узел представлял собой ретранслятор с функциями маршрутизатора (были использованы протоколы маршрутизации, принятые в стационарных сетях связи). Скорость передачи в данных сетях достигала десятков килобит в секунду.

Последующим проектом в 1983–1990 гг. был SURAN (Survivable Adaptive Radio Network) [12], предусматривающий автоматическое установление и поддержание маршрутов передачи для сетей большой размерности (до 10000 узлов) и определенного уровня мобильности узлов. Радиосредства стали компактнее и дешевле, с меньшим энергопотреблением. Планировалось использовать иерархический таблично-ориентированный метод маршрутизации.

Дальнейший технологический прогресс в области вычислительной техники и появление переносных ЭВМ потребовали их соединения с ведомственными сетями и сетью Интернет. В интересах разработки протоколов для сетей Ad Hoc была сформирована рабочая группа MANET (Mobile Ad Hoc Networking) под эгидой IETF (Internet Engineering Task Force) [2].

С 1994 г. DARPA инициировало программу создания глобальной мобильной информационной системы GloMo (Global Mobile Information Systems) [13]. Целью GloMo являлось (при использовании технологии беспроводных шлюзов WINGs (Wireless Internet Gateways)), обеспечить связность мобильных пользователей через сеть Интернет. Для военных было создано новое поколение цифровых радиосредств тактического уровня NTDR (Near-Term Digital Radio). NTDR имеет открытую архи-

тектуру, построено на основе коммерческих модулей и стандартных шин, использует Интернет-протоколы и обеспечивает взаимодействие с другими сетями. Кроме того, NTDR обеспечивает автоматическое конфигурирование сети, обмен информацией между компьютерами в полосе частот 225–450 МГц со скоростью передачи 288 Кбит/с, мощность передатчиков изменяется от 2 мВт до 20 Вт, дальность связи до 12,5 км. В бригаде используется до 400 радиосредств NTDR.

С появлением технологии Интернет стало возможным создание живучих сетей радиосвязи тактического звена управления – тактический Интернет ТИ (Tactical Internet), предполагающий незначительную модификацию коммерческих протоколов [14]. Так, для ТИ применялся известный в стационарных сетях протокол маршрутизации OSPF (Open Shortest Path First). Используя периодические HELLO-сообщения, каждый узел мог строить и находить маршруты передачи. Время организации такой сети было значительным, но в целом удовлетворяло требованиям того времени. Однако используемые в ТИ протоколы в полной мере не могли обеспечить обслуживание возросшего числа пользователей и объемов передаваемой информации и выполнить требования мобильности пользователей, оснащенных компьютером (в настоящее время в дивизии США около 1300 компьютеров, в полностью “компьютеризированной” дивизии – больше 5000 компьютеров).

Поэтому были определены основные технические требования к следующим поколениям тактической связи [15]. Это:

- 1) интеграция всех видов трафика (речь, IP данные, графика, видео, видеоконференции);
- 2) надежное функционирование на значительных географических площадях в условиях применения как обычного, так и ядерного, биологического и химического оружия;
- 3) полная мобильность всех пользователей и всех элементов сети;
- 4) засекреченность передачи всех видов информации;
- 5) минимальное участие человека в вопросах планирования и ведения связи.

Далее вместо разнородных и разнотипных средств радиосвязи (имеющихся на вооружении) предполагается создать унифицированное программируемое средство радиосвязи FDR / MBMMR / JTRS (Future Digital Radio / Multi-Band Multi-Mode Radio / Join Tactical Radio system), к которому предъявляются следующие основные требования [15]: открытая архитектура, программируемость, модульность построения, динамическое управление частотным ресурсом, поддержка коммерческого TCP/IP-протокола, обеспечение самоорганизации сети, передача засекреченной информации с использованием ретрансляции передаваемых пакетов, интеграция передачи речи и данных, дальность радиосвязи от 4 до 10 км.

В настоящее время идут исследования по созданию интеллектуальных радиосредств и сетей в целом, позволяющих адаптировать свои режимы и алгоритмы работы на основе решений, использующих базы данных и знаний.

Растущий коммерческий интерес к беспроводным сетям в 90-х годах прошлого века привел к появлению ряда стандартов и технологий физического и канального

уровней для переносных компьютеров: IEEE 802.11 различных версий, Bluetooth, HiperLan [16] и др. Однако эти стандарты и протоколы не учитывают особенностей построения и функционирования самоорганизующихся радиосетей.

Развитие элементной базы и возросшие вычислительные возможности на сегодняшний день определили многообразие самоорганизующихся радиосетей (рис. 1):

- сети Ad Hoc – сети со случайными, но стационарными абонентами;
- мобильные радиосети (сети MANET) – сети мобильных абонентов, реализующие полностью децентрализованное управление (отсутствие базовых станций);
- ячеистые сети (MESH) – сети ячеистой структуры, состоящие из беспроводных стационарных маршрутизаторов (создают беспроводную магистраль и зону обслуживания абонентов) и мобильных/стационарных абонентов, имеющих доступ (в пределах зоны радиосвязности) к одному из маршрутизаторов;
- сенсорные (телеметрические) сети, состоящие из малогабаритных сенсорных узлов с интегрированными функциями мониторинга определенных параметров окружающей среды, обработки и передачи данных по радиоканалам;
- автомобильные сети (сети VANET) – сети связи транспортных средств.



Рис. 1. Классификация самоорганизующихся сетей

Однако, несмотря на длительное время разработки самоорганизующихся сетей, и сегодня остаются нерешенными значительное количество проблем, препятствующих широкому распространению таких сетей в общей глобальной структуре телекоммуникаций. Среди них можно выделить такие проблемы.

1. Организация надежного транспорта данных при изменяемой структуре и топологии сети.

2. Повышение скорости передачи информации, которая обычно ограничена выделенным частотным ресурсом и методами доступа абонентов к коллективно используемому ресурсу.

3. Создание эффективных методов (алгоритмов) управления на различных уровнях "Эталонной модели" открытых систем Всемирной организации по стандартизации (ИСО) применительно к конкретной самоорганизующейся радиосети. Появление новых технологий радиосвязи (MIMO, систем определения местоположения, широкополосные и сверхширокополосные сигналы и др.), а также различные прикладные применения требуют создания новых методов управления данными сетями, в том числе использования методов искусственного интеллекта.

4. Проблема эффективного использования ресурсов узлов (большинство узлов сети могут быть портативными и соответственно ограничены в своих ресурсах: по производительности процессора, емкости памяти и энергоемкости батарей и др.).

5. Обеспечение заданного качества обслуживания для различных типов трафика, связанного со скоростью передачи, с задержкой и потерей пакетов, временем восстановления связности после ее потери.

6. Проблема масштабируемости и адресации в сетях при организации самоорганизующихся радиосетей большой размерности.

7. Взаимодействие с сетями общего пользования и сетью Интернет.

8. Обеспечение безопасности в условиях децентрализованного управления и широкоэмитальной природы радиоканала.

В настоящей монографии уделено внимание решению некоторых из указанных проблем, представляющихся, по мнению авторов, наиболее важными. Так, рассматривается способ увеличения пропускной способности сети за счет применения импульсных сверхширокополосных сигналов I-UWB (Impulse Ultra Wide Band). На основе этих сигналов можно создавать большие ансамбли взаимоортогональных сигналов, что в принципе позволяет осуществлять одновременную передачу многими абонентскими терминалами, находящимися в зонах взаимной радиовидимости. При этом протоколы множественного доступа к среде передачи (каналу связи) могут быть более эффективными, чем в сетях с традиционными узкополосными или широкополосными сигналами с небольшой базой сигнала. Кроме того, такие сигналы обладают целым рядом положительных свойств, позволяющих рассматривать их как альтернативу используемым в настоящее время так называемым "сигналам с полки". Импульсные сверхширокополосные сигналы решают проблему "закрытия информации" и самого факта передачи на сигнальном уровне.

Следует отметить и конструктивные особенности радиоаппаратуры для их генерации и приема – подавляющая часть узлов выполняется как цифровые на основе технологии CMOS, имеет высокую надежность и малое энергопотребление.

## Список литературы

1. Грамаков Ю.А. Концепции развития мобильной и беспроводной связи общего пользования // Электросвязь. – 2008. – № 12. – С. 51–57.
2. Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. [Электронный ресурс] – Режим доступа до журн.: <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>
3. Perkins C.E. Ad Hoc Networking / Perkins C.E. – Addison-Wesley Professional, 2001. – 452 p.
4. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62–68.
5. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: НТЦ "Мобильные коммуникации", 2003. – 384 с.
6. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
7. Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc. of the IEEE. – 1978. – 66. – P. 1468–1496.
8. Бушич С.Г., Вольтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. – К.: Техника, 1989. – 223 с.

9. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. – К.: Наук. думка, 2003. – 266 с.
10. Эфремидес Э., Уиллсмит Д.Э., Бейкер Д.Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР. – 1987. – 75, № 1. – С. 68–90.
11. Fifer W., Bruno F. The Low-Cost Packet Radio // Proc. of the IEEE – 1987. – 75. – P. 33–42.
12. Beyer D.A. Accomplishments of the DARPA SURAN Program // Military Communications Conference, – 1990. – Vol. 2. – P. 855–862.
13. Leiner B., Ruth R., Sastry A. Goals and Challenges of the DARPA GloMo Program // IEEE Personal Communications. – 1996. – 5. – P. 34–43.
14. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63–65.
15. Sharret I.P. WIN-T—The Army's New Tactical Intranet / Sharret I.P. // IEEE MILCOM'99. – 1999. – P. 45.04.01–45.04.05.
16. Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2002. – 384 с.



## ГЛАВА 1

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, ПАРАМЕТРЫ И ПРИМЕРЫ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ РАДИОСЕТЕЙ

#### 1.1. Классификация, параметры самоорганизующихся радиосетей

К основным параметрам самоорганизующихся радиосетей (СРС) можно отнести:

- *количество и мобильность узлов сети, размеры сети* (географической территории) и *плотность размещения узлов*;
- *связность* – обеспечивается возможностью обмена информацией между узлами непосредственно друг с другом (связь прямой видимости) или используется ретрансляция передаваемых сообщений; различная мощность передачи узлов приводит к появлению как симметричных, так и асимметричных каналов;
- *сетевую топологию* – определяется положением узлов и связями между ними; может характеризоваться динамикой ее изменения, вызванной как мобильностью самих узлов, так и внешней помеховой обстановкой;
- *тип трафика* – зависит от предназначения сетей (речь, передача данных, видео, телеметрия и др.);
- *внешнюю среду* – определяет условия функционирования сети (город, лес, горы, поле боя и т.д.).

На рис. 1.1 представлена классификация самоорганизующихся радиосетей по [1–8]:

- 1) способу построения системы управления сетью – одноуровневые (flat) и иерархические;
- 2) мобильности узлов сети – стационарные, мобильные и гибридные;
- 3) способу разделения радиоресурса – с детерминированным, случайным или гибридным способом разделения радиоресурса;
- 4) способу синхронизации – синхронные и асинхронные;
- 5) ширине полосы пропускания радиоканала – узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные (UWB);
- 6) составу оборудования узлов: одноканальные и многоканальные (один узел содержит несколько приемопередатчиков); однородные и неоднородные (радиотерминалы с различной мощностью и производительностью процессора, объемом памяти, емкостью батареи и др.); имеющие или не имеющие систему позиционирования (например, GPS); имеющие всенаправленные антенны или антенны с направленной диаграммой направленности (например, MIMO);

Окончание табл. 1.3

Преимущества (+) и недостатки (-) самоорганизующихся радиосетей	Средства достижения преимущества
Незначительное расстояние непосредственной связи (-)	Использование связи в условиях прямой видимости – зависимость дальности связи от частоты, мощности, типа антенны и т.п. Использование маршрутизации в сети
Передача разных видов трафика (+)	Применение эффективных протоколов физического, канального, сетевого и транспортного уровней (протоколов поддержки заданного качества обслуживания – QoS). Координация взаимодействия протоколов OSI. Интеллектуализация процессов принятия решений по управлению сетью
Маршрутизация (+)	Применение эффективных методов маршрутизации
Высокая безопасность (+)	Применение гибридных систем защиты (симметричных и асимметричных), создание распределенных трастовых центров, систем выявления вторжений и т.п.
Высокая помехозащищенность (+)	Использование широкополосных сигналов (метод частотных прыжков – FHSS, метод прямой последовательности – DSSS), в перспективе – применение гибридных схем распределения ресурсов (FDMA/TDMA/CDMA), применение сверхширокополосных сигналов

Можно выделить требования к перспективным радиосредствам военного назначения:

- высокая пропускная способность радиоканала ( $> 200$  Кб/с);
- многодиапазонность и многофункциональность (FDMA/TDMA/CDMA), в перспективе – использование импульсных сверхширокополосных сигналов;
- способность программирования всех видов и режимов работы;
- автоматизация процессов ведения связи (режим “включил и работай” – Plug-and-Play) и возможность самоорганизации сети;
- интеллектуальность, децентрализованность и оптимизация функций управления сетевыми ресурсами (маршрутизация, нагрузка, топология, радиоресурс, безопасность и т.д.) [1];
- работа с разными видами трафика (голос, данные, видео);
- наличие системы позиционирования, направленных антенн, работа в движении;
- модульность выполнения, открытая архитектура, низкое энергопотребление.

В то же время существуют весомые трудности создания самоорганизующихся радиосетей – необходимость решения значительного количества научных проблем (маршрутизация, распределение радиоресурсов, управление мощностью, управление

топологией, децентрализованное управление, безопасность, обеспечение заданного качества передачи информации и т.п.) при ограничениях на ресурсы радиотерминалов (по объему памяти, производительности процессора, энергоемкости батареи и т.д.).

**2-й уровень** мобильной компоненты (рис. 1.4) образует сеть мобильных базовых станций (наземная магистральная сеть). Она предназначена для улучшения качества связи, прежде всего, повышение производительности мобильной компоненты и предоставление заданного качества обслуживания абонентов (QoS).



Рис. 1.4. Сеть мобильных базовых станций (самоорганизующаяся радиосеть 2-го уровня)

Каждая мобильная базовая станция представляет собой узел (шлюз) коммутации, который с помощью имеющихся средств радиопередачи:

1) создает сеть МБС по принципам самоорганизующейся радиосети (а не по принципам сотовой или транкинговой сети!) с использованием направленных антенн. Для функционирования сети МБС в режиме самоорганизации необходимо решать задачи динамического формирования (переформирование) топологии сети, маршрутизации, распределения радиоресурсов (наиболее целесообразно использовать детерминированные методы распределения радиоресурсов) и т.п. [2–6]. Также для увеличения производительности и разведзащищенности сети МБС возможно использование средств оптического диапазона – лазерных систем передачи;

2) обеспечивает доступ мобильных абонентов к использованию ресурсов сетей мобильных базовых станций и беспилотных летальных аппаратов (БЛА);

Дополнительной составляющей мобильной компоненты могут служить сенсорные сети (**0-уровень**), которые обеспечивают прием и передачу разведывательной информации о противнике и выдаче ее органам управления войсками и оружием. Сенсорные устройства представляют собой интегрированную платформу, которая объединяет возможности сенсоров (внешних датчиков, регистрирующих совокуп-

ность физических параметров – акустических, вибрационных, радиационных, химических, биологических и т.п.) с микрокомпьютерами, соединенных в беспроводную сеть. Принцип построения – децентрализованное управление (для сенсорных сетей значительной размерности – иерархическое) [12].

На рис. 1.5 приведен пример функционирования наземных стационарных сенсорных сетей: выявление сенсорами движения танка неприятеля, передача координатной информации местоположения танка (по сенсорной и другим сетям) средствам поражения (например, боевому вертолету) и уничтожение танка.

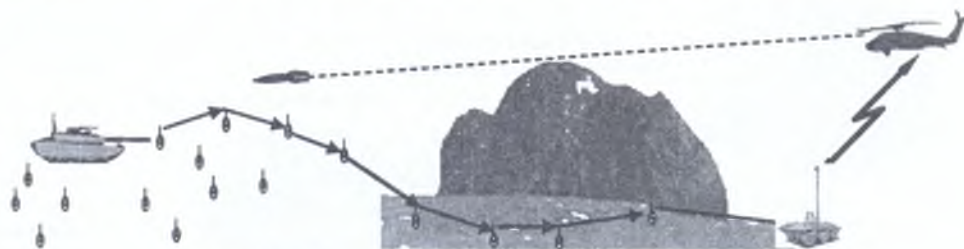


Рис. 1.5. Применение наземной стационарной сенсорной сети

Для связи между географически разделенными группировками войск (зонами сети) или повышение надежности связи между МБС и производительности мобильной компоненты создается **третий (верхний) уровень** – воздушная магистральная сеть, которая может быть реализована на беспилотных летательных аппаратах (самолет, дирижабль) (рис. 1.6), а также спутниках. Предложения относительно создания сети БЛА в интересах всей Украины могут быть найдены в [13].

Каждый БЛА оснащен двумя типами радиосредств с использованием направленных антенн: первый – для связи с МБС или выделенными абонентами первого (нулевого) уровней; второй – для обмена информацией с соседними БЛА. Беспилотные летательные аппараты объединены в сеть воздушных узлов коммутации сообщений (пакетов) с реализацией функций маршрутизации: сбор (рассылка) маршрутной информации, ее хранение, вычисление маршрутов, передача пакетов по маршрутам двух типов. Первый тип маршрута обуславливает ретрансляцию трафика в пределах своей зоны обслуживания, второй – между разными ( $m-n$ ) зонами: абонент<sub>г</sub>–МБС<sub>г</sub>–БЛА<sub>г</sub>–...–БЛА<sub>н</sub>–МБС<sub>н</sub>–абонент<sub>м</sub>.

Преимущества применения сети на БЛА состоят в следующем (рис. 1.6):

- 1) обеспечивается связность между географически разделенными группировками войск (зонами мобильной компоненты);
- 2) повышается надежность связи между МБС в пределах одной зоны за счет появления альтернативных независимых маршрутов передачи;
- 3) повышается производительность сети за счет использования радиоканалов между БЛА с большей пропускной способностью в сравнении с радиоканалом типа МБС–МБС, эффективности управления мобильным компонентом (уменьшается

объем переданной служебной информации и снижается время ее сбора), сокращения в несколько раз количества ретрансляций в маршрутах передачи информации и т.д.;

4) обеспечивается заданное качество обслуживания абонентов (QoS) за счет применения детерминированных протоколов множественного доступа [14];

5) обеспечивается дистанционный сбор разведывательной информации или ее снятие с датчиков сенсорных сетей.



Рис. 1.6. Сеть на БЛА

Таким образом, система связи тактического звена развивается в направлении применения открытой архитектуры, внедрения новейших телекоммуникационных технологий, которые используются в коммерческих системах связи. Существующие гражданские технологии (физического и канального уровней) беспроводных сетей связи представляют собой основу для создания мобильных радиосетей тактического уровня.

Новая архитектура мобильной компоненты систем военной связи – трехуровневая иерархия неоднородных самоорганизующихся радиосетей (мобильные абоненты – мобильные базовые станции – беспилотные летательные аппараты) типа MANET. Реализация каждого ее уровня позволит значительно улучшить качество функционирования системы связи и параметры информационного обмена. Однако для ее реализации необходимо решение ряда проблем научного (разработка математического и программного обеспечения интеллектуальной децентрализованной системы управления и т.п.) и технологического плана (построение программируемых многофункциональных многодиапазонных радиосредств).

Применение предложенной архитектуры мобильной компоненты приведет к появлению принципиально новых форм (способов) ведения боевых действий, изменит формы и способы управления войсками, а также позволит значительно увеличить боевую эффективность войск.

### 1.2.2. Меш-сети

Беспроводный доступ последнее время получает все большую популярность как в сотовых сетях связи, так и в беспроводных локальных сетях WLANs (Wireless Local Area Networks), которые обычно ассоциируются с семейством стандарта IEEE 802.11 (называемого популярно Wi-Fi). Одна из самых заметных тенденций последних лет в Европе – чрезвычайно быстрый рост беспроводных сетей, подкрепляемый потребительским спросом на ноутбуки со встроенной поддержкой Wi-Fi.

Данные технологии (совершенно различные по принципам построения) предназначены для обеспечения связности между абонентами и могут найти применение значительному количеству приложений. Однако превращение Wi-Fi в действующий инструмент корпоративной коммуникации и подлинно массовую технологию обмена данными ставит перед разработчиками серьезную проблему “бесшовного” межсетевое роуминга. Эта проблема решается в рамках ячеистой (mesh) архитектуры и именно с ее внедрением аналитики связывают очередной виток роста беспроводных сетей [15, 16].

Сотовые сети при большом покрытии обеспечивают относительно невысокую скорость передачи информации. Даже третье поколение сетей 3G имеет невысокую скорость передачи данных (не более 2 Мб/с) по сравнению со скоростями в беспроводных локальных сетях (более 50 Мб/с для протоколов IEEE 802.11a, IEEE 802.11g и других подобных решений). С другой стороны, сети WLANs в большинстве своем имеют меньшее покрытие и, соответственно, ограничивают мобильность абонентов. Кроме того, для увеличения покрытия WLANs необходимо построение соответствующей проводной магистрали.

Беспроводные городские сети WMANs (Wireless Metropolitan Area Networks), основанные на семействе стандартов IEEE 802.16, частично устраняют данные недостатки и обеспечивают высокую скорость передачи с гарантированным качеством обслуживания значительному количеству пользовательских баз (до десятков миль между базовыми станциями). Основным недостатком WMANs – это отсутствие (на сегодня) поддержки мобильности и необходимость прямой видимости (если пользователь не имеет связности прямой видимости с базовой станцией WMANs, то и маловероятно получение данного сервиса). Обычно из-за высокой плотности преград (строящиеся многоэтажки или деревья) более половины пользователей потенциально не могут обеспечить радиосвязь прямой видимости. Кроме того, оборудование базовых станций довольно сложно и дорого.

Беспроводные ячеистые сети (БЯС) или WMN (Wireless Mesh Networks) потенциально исключают многие из перечисленных недостатков и при этом обеспечивают дешевый беспроводный доступ к Интернет (проводной сети) для фиксированных и/или мобильных абонентов (действующий протокол беспроводных ячеистых сетей – IEEE 802.11s). На рис. 1.7 представлен типовой вариант построения БЯС, которая состоит из беспроводных маршрутизаторов (mesh-маршрутизаторов), шлюзов и абонентов. Для подключения к Интернет достаточно одного шлюза.



Рис. 1.7. Вариант беспроводной ячеистой сети

Каждый абонент оснащен радиооборудованием для связи с mesh-маршрутизаторами, которые образуют беспроводную магистраль ячеистой сети и обеспечивают динамическую маршрутизацию пакетов между собой. Mesh-маршрутизаторы фактически являются стационарными узлами (обычно монтируются на видимых участках крыш домов (рис. 1.8)).

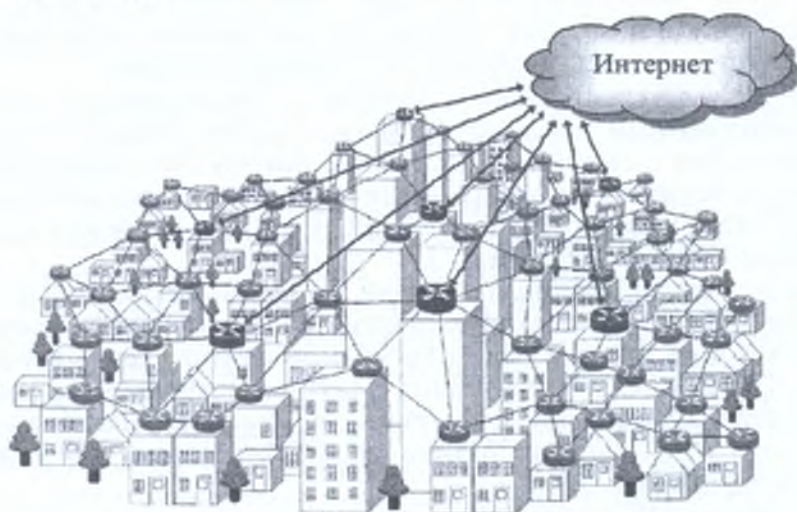


Рис. 1.8. Пример МЯС

Оборудование mesh-маршрутизаторов отличается от оборудования абонентов следующими основными характеристиками: большая мощность передачи, наличие нескольких приемопередающих устройств и антенн, поддержка нескольких беспроводных протоколов, отсутствие ограничений на потребляемую мощность, реализа-

ция протоколов маршрутизации и др. В общем случае архитектура БЯС иерархична и представлена следующими элементами:

- верхний уровень – шлюзы (специфические маршрутизаторы), связанные с Интернетом высокоскоростными проводными каналами;
- средний уровень – магистральная сеть стационарных беспроводных маршрутизаторов;
- низший уровень – сеть, которую образуют стационарные или мобильные пользователи, связанные в ячейке с беспроводным маршрутизатором (в общем случае абоненты также могут выступать в роли маршрутизаторов, т.е. могут передать данные друг через друга – фактически образуя сеть типа MANET – Mobile ad-hoc Networks).

Алгоритм обмена информацией состоит в следующем. При необходимости передачи mesh-абонентом данных адресату (mesh-абоненту или шлюзу), не находящемуся с ним в непосредственной зоне радиосвязности, пакет передается ближайшему mesh-маршрутизатору. Далее пакет (согласно принятому протоколу маршрутизации) передается по маршруту беспроводной магистрали, пока не достигнет mesh-маршрутизатора, имеющего радиосвязность с адресатом, который и передаст пакет адресату.

Обычным способом организации беспроводных ячеистых сетей является использование в радиоканалах отдельных стандартов (для уменьшения помех) между маршрутизаторами магистрали и каналами маршрутизатор–абонент. Например, стандарт IEEE 802.11a может быть использован для каналов магистрали, а стандарт IEEE 802.11b – для связи между абонентом и маршрутизатором.

БЯС предоставляют возможность перейти от локализованных точек доступа к полностью беспроводным зонам, охватывающим здание (кампус) или даже город. Сетевые архитекторы и системные интеграторы получают беспрецедентную свободу и гибкость в инсталляции высокопроизводительной сети в рекордно короткое время. При этом отсутствие проводки существенно снижает стоимость и упрощает текущие операции по настройке сети.

Отсутствие дополнительных требований к БЯС (за исключением маршрутизации) объясняет гибкость и многовариантность их построения. Например, доступ к Интернет может быть проводным или беспроводным (типа точка-точка или точка-многоточка). Пользователи могут входить в сеть по внутренним беспроводным каналам, используемым для связности мобильных абонентов, или применять другие технологии (сети Wi-Fi, сотовые, WiMax, MANET, сенсорные) и работать с различными приложениями (рис. 1.9).

Особенностями БЯС (одни из них присущи ячеистым сетям, другие расширяют понятие гибридных MANETs [15–17]) являются следующие характеристики.

**Беспроводность.** БЯС, с одной стороны, ограничена в дальности передачи из-за затухания при распространении радиоволн, потенциально имеет высокую величину ошибок и потерь пакетов, а с другой, – обеспечивает мобильность абонентов.

**Многоскачковость.** Обычная беспроводная сеть увеличивает покрытие сети за счет повышения мощности передачи или добавления дополнительных точек досту-





Рис. 1.9. Вариант построения гибридной ячеистой сети

па. В противоположность этому узлы БЯС, используя многоскачковую маршрутизацию, передают данные без увеличения радиуса передачи.

**Избыточность.** Беспроводная магистраль формирует ячеистую сеть. Это обеспечивает дополнительные каналы (маршруты) между mesh-маршрутизаторами, mesh-шлюзами и mesh-абонентами. Отказ канала или узла не приводит к отказу в передаче сообщения.

**Мобильность.** В общем случае mesh-маршрутизаторы и mesh-шлюзы также могут быть мобильными. В этом случае БЯС фактически становится двухуровневой сетью MANET, проблемы управления которой описаны в [17]. В отличие от MANET ячеистые сети имеют определенную иерархическую архитектуру. Mesh-шлюзы и mesh-маршрутизаторы формируют квазистатичную магистраль, не ограничены в мощности передатчиков и производительности процессоров, могут оснащаться несколькими приемопередатчиками. Абонент, не реализующий функции маршрутизации, может быть внедрен в БЯС без всяких ограничений (в противоположность MANET, где все узлы должны выполнять функции маршрутизатора).

Благодаря своим особенностям ячеистые сети могут быть использованы в различных сферах.

**Широкополосный доступ к Интернет.** Пока еще значительное количество пользователей не имеет возможности подключиться по кабелю или DSL-каналам к Интернет. Решение этого вопроса – использование БЯС. Так, в Европе публичный доступ к Интернет пока предоставляют несколько городских БЯС, в США эта услуга значительно более развита. В Москве продолжается строительство ячеистой сети

стандарта Wi-Fi, насчитывающей более 6 тыс. базовых станций. В Тайбэе (Тайвань) развернута ячеистая сеть, включающая 10 тыс. точек беспроводного доступа на территории около 75 тыс. кв. км.

*Сети поселков.* Локальные сети стремительно шагнули за пределы крупных городов, где конкуренция очень велика. Многие Интернет-провайдеры занялись подключением коттеджных и дачных поселков, где беспроводное подключение является единственно рентабельным способом подключения клиентов. Аналогичная ситуация сложилась и в регионах с малоэтажной застройкой, когда тянуть кабель в каждый дом с несколькими квартирами просто не выгодно. На рис. 1.10 представлен один из вариантов сети поселка.



Рис. 1.10. Пример сети поселка

*Сети помещений, предприятий.* Для получения покрытия с использованием протокола 802.11 требуется значительное количество точек доступа, которые в свою очередь связаны Ethernet-сетью. Ячеистые сети позволяют обеспечить связность точек доступа без прокладки кабеля.

Гетерогенные сети ячеистой топологии, объединяющие большое число беспроводных датчиков и сравнительно немногочисленные точки доступа с кабельными каналами, могут стать практичным и экономически выгодным решением на предприятиях. Объединение датчиков в сеть позволит автоматизировать сбор данных и сократить затраты на ручной сбор данных. Создание кабельных сетей было бы непрактично и дорого. Арендные помещения служат хорошим примером целесообразности разворачивания БЯС.

*Домашние сети.* В данной среде существенным преимуществом использования ячеистой сети является ее способность поддерживать приложения, требующие большой пропускной способности (например, для передачи видео высокого разрешения). Использование БЯС в домашних условиях поможет связать настольный ПК, ноутбук и карманные компьютеры, телевизионные приемники высокого разрешения, проигрыватели DVD, игровые приставки, видеокамеры и другие бытовые электронные устройства без необходимости прокладки кабелей, установки сетевых розеток и специальной настройки устройств.

*Городские сети.* В городской среде с неоднородным покрытием или в корпоративной среде с различным типом оборудования БЯС решает также проблемы взаимодействия разных беспроводных сетей (а также проводных и беспроводных сетей). В большинстве случаев внедрение БЯС устраняет необходимость прокладки магистральной линии связи.

Обычно в городах и мегаполисах экстренные службы используют собственные, закрытые коммуникационные системы, работающие на разных радиочастотах. В результате стихийного бедствия данные радиосистемы не позволяют сотрудникам таких служб связываться друг с другом. В случае функционирования на территории города БЯС сотрудники всех экстренных служб смогут подключать к данной единой сети свои коммуникационные устройства.

*Доступ мобильных абонентов.* Третье поколение сетей 3G обеспечивает относительно высокую скорость передачи данных (до 3,6 Мб/с для стационарных пользователей и 144 Кб/с для высокомобильных пользователей). Внедрение БЯС позволит уже сейчас получить более высокие скорости передачи при отсутствии получения дополнительных лицензий и незначительных инвестициях.

*Ячеистые сети коммунальных служб.* В качестве узлов выступают узлы (счетчики) электроэнергии, газа и воды в одной сети. Счетчики образуют самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся беспроводную ячеистую сеть, которая управляется через шлюз. Узлы периодически передают в шлюз накопленные данные. Один шлюз может поддерживать до тысячи приборов учета. Хранение данных в каждом узле, автоматическая синхронизация времени и реорганизация сети в обход нарушенных каналов связи позволяют получить надежное, мощное, экономичное и отказоустойчивое решение для учета расхода ресурсов.

*Ячеистые сети военного применения (обеспечения общественной безопасности).* Такими сетями являются, например, ячеистые тактические сенсорные сети (крошечные сенсоры, оснащенные приемопередатчиками с функциями маршрутизации). Каждый сенсор обеспечивает беспроводную передачу информации по сенсорной сети (например, координаты танка) командованию для ее анализа и принятия решения.

*Ячеистые сети для передачи развлекательной информации.* В течение следующих пяти лет действительно мобильные ячеистые сети появятся на автострадах, и тысячи автомобилей, оснащенных этой технологией, превратятся в сетевые узлы. На-

пример, фирма "Moteran" оснащает автомобили широкополосным оборудованием для ячеистых сетей, которые используются для связи и передачи развлекательной информации.

*Преимущества ячеистых сетей. Невысокая стоимость инвестиций.* Технология ячеистых сетей создает перспективы развертывания беспроводной среды, не требующей особого планирования архитектуры. В итоге создание беспроводной сети становится дешевле по сравнению с традиционными WLAN. Установка и подключение точки доступа обходится в сумму менее 500 дол. Поэтому БЯС вызывают большой интерес муниципалитетов и других организаций, имеющих ограниченный бюджет.

*Значительное покрытие пользователей.* Благодаря многоскачковой маршрутизации не требуется наличие прямой связности между абонентом и базовой станцией.

*Быстрое развертывание и масштабируемость.* Новый абонент может быть подключен к БЯС за несколько минут вместо месяцев, необходимых для построения новой кабельной сети. Поэтому БЯС найдут свое применение на выставках, конференциях и других мероприятиях.

*Живучесть.* БЯС обычно использует несколько шлюзов для подключения к Интернет, маршрутизаторы обеспечивают децентрализованное построение и поддержание маршрутов в зависимости от ситуации на сети. Особенность ячеистой сети – отсутствие центра управления, возможность самоорганизации и самоадаптации в соответствии с изменяющимися параметрами среды (автоматическое конфигурирование и реконфигурирование).

*Высокая пропускная способность.* Физические свойства беспроводных каналов таковы, что на более коротких расстояниях пропускная способность сети выше. Одним из способов повышения пропускной способности сети является передача данных через несколько ретрансляторов, находящихся на малых расстояниях. Поэтому БЯС может обеспечить повышение пропускной способности сети (при требовании меньшей мощности передатчика и удовлетворении при этом всем законодательным нормам, ограничивающим максимальную мощность передатчиков).

*Пространственное разделение.* Такое разделение является еще одним преимуществом БЯС по сравнению с одноузловыми сетями (устройств, совместно использующих одну точку доступа). В БЯС множество устройств могут подключаться одновременно через разные узлы. Малые расстояния передачи данных в БЯС позволяют уменьшить влияние помех и осуществлять одновременную передачу пространственно разделенных потоков данных.

*Интеллектуальность.* Интеллектуальность интегрирована непосредственно в БЯС и обеспечивает автоматизацию процесса администрирования и оперативного управления сетью. Точка доступа при включении автоматически обнаруживает другие точки доступа и "выясняет" свою роль в сети. Это исключает необходимость ручного администрирования сети и играет важную роль для оперативного развер-

тивания оборудования. Как только сеть запускается в эксплуатацию, она начинает автоматически управлять своей работой.

*Проблемы создания и развития БЯС.* Несмотря на большой потенциал БЯС, до сих пор остается ряд проблем, препятствующих их повсеместному распространению. Основные из них: функциональная совместимость; эффективность протоколов на каждом из уровней эталонной модели OSI; качество обслуживания передачи; управление сетью; безопасность передачи.

*Функциональная совместимость.* Распространению БЯС способствует ее способность взаимодействия с существующими сетевыми стандартами и протоколами (Ethernet, VPN, VLAN, OSPF и др.). Эта способность позволяет множеству БЯС разных производителей взаимодействовать на канальном и сетевом уровнях OSI, включая протоколы IPv4 и IPv6. Сеть должна объединять множество устройств с разными интерфейсами беспроводной связи. Поэтому в настоящее время в корпорации "Intel" ведутся работы по решению этой задачи на уровне устройств – разрабатываются перенастраиваемые радиопередающие системы, адаптирующиеся к любой среде беспроводной связи. Такой подход является существенно менее дорогостоящим, чем реализация нескольких беспроводных интерфейсов в каждом устройстве.

*Физический уровень.* На этом уровне БЯС должна отвечать следующим требованиям: адаптации радиоканала (минимизация ошибок за счет комбинации различных типов модуляции и способов кодирования); регулировке мощности передачи (с целью минимизации помех, минимизации задержки передачи и др.); наличию нескольких приемопередатчиков, использованию направленных антенн и др. В перспективе рассматривается применение программируемых радиосредств (soft radio), MIMO-технологий, сверхширокополосных сигналов (UWB) и др.

*Канальный уровень.* По сравнению с классическими беспроводными WLANs MAC-протоколы для БЯС требуют децентрализованного кооперативного функционирования узлов на расстояние, большее чем одна ретрансляция, и должны учитывать мобильность абонентов и направленность трафика (абонент–шлюз). Использование случайных протоколов доступа в БЯС неэффективно и поэтому перспективным являются: использование гибридных схем временного и кодового разделения каналов, нескольких каналов вместо одного (в одном маршрутизаторе несколько радиointерфейсов), а также интеграция в беспроводные маршрутизаторы различных протоколов (IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.15) и др.

*Сетевой уровень (маршрутизация).* Основная задача уровня – обеспечение передачи пакета от отправителя к адресату посредством нескольких ретрансляций. В этом отношении БЯС радикально отличаются от технологий 3G, WLANs, WMANs, использующих единственный беспроводный канал и поэтому не требующих сетевого уровня. В БЯС же (как и в MANET) узлы строят и поддерживают маршруты для передачи пакетов. В качестве основных требований к методам маршрутизации можно отнести следующие [16, 18]: масштабируемость, эффективность, надежность, адаптивность, обеспечение заданного качества обслуживания (QoS).

На сегодня значительное множество методов маршрутизации предложено для MANET [18]. Однако в MANET трафик может существовать между любой парой узлов и все узлы мобильны, тогда как в БЯС трафик имеет направленность (абонент—шлюз); кроме того, абоненты могут быть как мобильными, так и стационарными. Очевидно, что ряд протоколов маршрутизации, предложенных для MANET, с определенными доработками может быть использован и в БЯС [19]. Для максимизации производительности при передаче трафика могут применяться различные метрики, учитывающие полосу пропускания, уровень сигнала, его стабильность, задержку или другие параметры канала (узла).

*Транспортный уровень.* Протоколы транспортного уровня специально пока не предложены для БЯС. Однако значительное количество протоколов, предложенных для MANET, могут служить основой для создания протокола транспортного уровня, ориентированного на БЯС [20].

*Управление сетью.* Большинство из функций управления сетью должны быть реализованы в БЯС [1], например мониторинг сети, управление мощностью передачи и др.

*Качество обслуживания.* Различные приложения генерируют потоки данных различной интенсивности и имеют различные требования к пропускной способности [21]. Проблема — классификации и приоритизации трафика в узлах (и в объеме всей сети) для достижения максимальной производительности и обеспечения максимума удобств пользователей.

*Безопасность БЯС.* Безопасность определяется следующими особенностями: децентрализованной сетевой архитектурой, уязвимостью радиоканала и динамичностью топологии. Сервисы безопасности (секретность, подлинность, целостность, контроль доступа, неопровержимость) должны учитывать особенности СРС и обеспечиваться теми или иными механизмами безопасности с целью защиты от определенного множества атак [22, 23].

Таким образом, беспроводные ячеистые сети предлагают наиболее экономически выгодное и гибкое решение беспроводной связи. Хотя технология пока что находится в стадии развития, она уже демонстрирует значительный потенциал в области создания эффективных беспроводных вычислительных сред, отвечающих требованиям бизнеса, обладающих возможностью использования в домашних условиях, в промышленности и среди поставщиков услуг широкополосной связи.

Технология успешно сочетается с другими традиционными технологиями (3G, WLANs, WMANs). Основной ее недостаток — это относительная сложность ее комбинирования с другими беспроводными технологиями при сочетании функций хоста и маршрутизатора в каждом узле сети. Однако научные исследования последних лет свидетельствуют о скором создании эффективных беспроводных ячеистых сетей [24].

### 1.2.3. Сенсорные сети

В последние годы во всем мире все более пристальное внимание привлекают к себе “беспроводные сенсорные сети” (“Wireless Sensor Networks”, далее — просто

сенсорные сети). Основным их отличием от классических радиосетей является использование в качестве объектов сети большого числа сверхминиатюрных и дешевых устройств. Данный подход к формированию сети позволяет адаптировать сенсорные сети к решению чрезвычайно широкого спектра задач. В частности, одним из основных применений сенсорных сетей является создание разнообразных систем мониторинга и контроля. Следует ожидать, что в недалеком будущем сенсорные сети займут свою весьма обширную нишу среди имеющихся телекоммуникационных технологий, использующих беспроводную радиосвязь.

Сенсорные сети состоят из малогабаритных сенсорных узлов с интегрированными функциями мониторинга окружающей среды, обработки и передачи данных [12]. Основными элементами сенсорных узлов являются (рис. 1.11): датчики контроля физических параметров внешней среды, микрокомпьютер, батареи, приемопередатчик (возможно наличие системы позиционирования).



Рис. 1.11. Сенсорный узел

В конструктивном плане основным отличием сенсорных сетей от классических телекоммуникационных радиосетей является использование в качестве объектов сети большого числа сверхминиатюрных и дешевых устройств. Каждое устройство может содержать различные датчики физических параметров окружающей среды (освещенность, температура, влажность, давление, датчики вибраций и др.), а также средства для первичной обработки и хранения полученных данных. Количество объектов в такой сети теоретически определяется только областью применения и бюджетом и благодаря низкой цене отдельных устройств (порядка нескольких долларов и ниже) может быть весьма велико (порядка нескольких тысяч и выше). В эксплуатационном плане основными отличиями являются, во-первых, специфические системные требования (работа при различных внешних условиях, возможность случайных перемещений отдельных устройств и динамических изменений в топологии сети) и, во-вторых, жесткие реализационные ограничения (по энергопотреблению, вычислительной мощности встроенного процессора, объему встроенной памяти и др.). При этом скромные возможности отдельных объектов сети предназна-

ны в первую очередь для передачи небольших объемов информации с малой скоростью.

С учетом потребности в радиосвязи, ориентированной на устройства с низким энергопотреблением в 2003 г., организацией IEEE был принят стандарт IEEE 802.15.4, в котором определены физический и канальный уровни стека сетевых протоколов в беспроводных сетях, отвечающих данным запросам. В этом документе на физическом уровне определены три диапазона частот: 868, 910 МГц и 2,4 ГГц. В данном диапазоне определены 16 каналов шириной 5 МГц с такими несущими частотами:

$$F_c = 2405 + 5(k - 1) \text{ МГц}, k = 1, \dots, 16.$$

Скорость передачи в каждом канале составляет 250 Кб/с. Кроме того, на физическом уровне определены возможности включения/выключения передатчика, оценка уровня помех в канале, прием/передача данных, оценка уровня принимаемого сигнала. На канальном уровне найдены механизмы доступа к общей среде передачи данных, приведены общие рекомендации к построению топологии сети. В зависимости от требований предметной области такая сеть может работать в топологиях типа "точка-точка" или "звезда", причем топология типа "звезда" в полной мере отвечает описанному выше сценарию использования беспроводной сети.

Организация вышестоящих уровней в документе IEEE 802.15.4 не рассматривается, поэтому на данный момент доступно несколько вариантов организации полного стека сетевых протоколов, основанных на данном стандарте, в частности, WirelessHART, ISA100, ZigBee, из которых наиболее популярен ZigBee, добавляющий к IEEE 802.15.4 сетевой уровень и уровень приложений. На сетевом уровне ZigBee определены механизмы маршрутизации и управления сетью (формирование логической топологии сети).

Общая классификация тактических сенсорных сетей приведена на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Классификация сенсорных сетей

*Стационарные, подвижные и гибридные сенсорные сети.* Можно использовать стационарные сенсорные узлы и подвижные сенсоры-роботы для сбора информации среди сенсорных узлов. Мобильные сенсорные сети относятся к классу MANET, а стационарные — к классу ячеистых беспроводных сетей (Wireless Mesh Network).



*Децентрализованные, иерархические и гибридные сенсорные сети.* Иерархическая организация сети допускает разбивку сети на зоны (кластеры) с выделением в каждой зоне главных и простых сенсоров-узлов, а также сенсоров-шлюзов (для связи между зонами). Она является комбинацией централизованного (в зонах) и децентрализованного (между главными узлами) способов управления.

*Наземные, подземные, морские, воздушные сети.* Примером таких сетей может служить развернутая на дне океана еще в 60-е годы прошлого века военным агентством DARPA подводная сенсорная сеть слежения за советскими подводными лодками.

*Акустические, оптические, сейсмические, химические и другие подобные сети.* В зависимости от среды мониторинга в сенсорах используют датчики, которые регистрируют определенные физические параметры (например, уровень радиации).

Преимущества технологий беспроводных сенсорных сетей могут быть эффективно использованы для решения различных прикладных задач, связанных с распределенным сбором, анализом и передачей информации.

1. Автоматизация процесса сбора данных внутри помещений: мониторинг температуры, расхода воздуха, присутствия людей и управление оборудованием для поддержания микроклимата; управление освещением; управление энергоснабжением; сбор показаний квартирных счетчиков газа, воды, электроэнергии и т.д.; охранно-пожарная сигнализация; мониторинг состояния несущих конструкций зданий и сооружений.

2. Дистанционный контроль и диагностика промышленного оборудования; техническое обслуживание оборудования по текущему состоянию (прогнозирование запаса надежности); мониторинг производственных процессов; телеметрия для исследований и др.

3. Мониторинг окружающей среды (загрязнений, сельское хозяйство и др.).



Рис. 1.13. Архитектура тактической сенсорной сети

4. Здравоохранение: мониторинг физиологического состояния пациентов, контроль местоположения и оповещение медицинского персонала.

5. Безопасность и оборона: контроль над перемещением людей и техники; контроль периметра и дальнейшее наблюдение; помощь в проведении спасательных операций; мониторинг имущества и ценностей; охранно-пожарная сигнализация, средства разведки. Архитектура тактической сенсорной сети приведена на рис. 1.13. Основные элементы (характеристики – в табл. 1.4) [25]: сенсорные узлы, шлюз, беспроводный мост, контролер.

Таблица 1.4

Характеристика	Сенсор	Тактический шлюз	Беспроводный мост	Контролер сети
Тип сети (протоколы)	Ad Hoc mesh	Ad Hoc mesh	Wi-Fi или UWB	Ad Hoc mesh Mil-STD 188-220
Скорость передачи	До 100 Кб/с	До 300 Кб/с	До 300 Кб/с	> 100 Кб/с
Наличие GPS	Да	Да	Да	Да
Безопасность	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование
Типы сенсоров	Инфракрасный, акустический, температурный, вибрационный, магнитометр	–	–	–
Время жизни	30–45 суток	60–120 суток	60–120 суток	60–120 суток
Батареи	Типа АА	Нет данных	Нет данных	Типа АА
Дальность передачи	300 м на отрезке прямой видимости	0,5–6 км в зависимости от антенны и местности	1–7 км в зависимости от типа антенны и местности	До 300 м в зависимости от типа антенны
Размер	2,5 дюйма, диаметр × 6 (без антенны)	8×4×6 дюймов	8×4×6 дюймов без антенны	3, 250×4, 125×1, 12 дюйма без антенны
Вес	16 унций с батареями	4 фунта без батарей	4 фунта без батарей	1,2 фунта с батареями
Опции			Поддержка сотовых и радиотелефонов, солнечные батареи	

Сенсорные узлы тактических сетей должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии сети, трафика и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления тактической сенсорной сетью [25].

#### 1.2.4. Автомобильные сети

Среди приоритетных направлений развития необходимо отметить организацию связи транспортных средств на дорогах – решение этой задачи должно привести к построению целевых (или смешанных целевых/инфраструктурных) автомобильных беспроводных сетей. Создание подобных сетей, получивших в англоязычной литературе название VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), представляется наиболее важной концепцией повышения эффективности и безопасности дорожного движения в будущем, а также увеличения доходов операторов связи [26] (рис. 1.14).

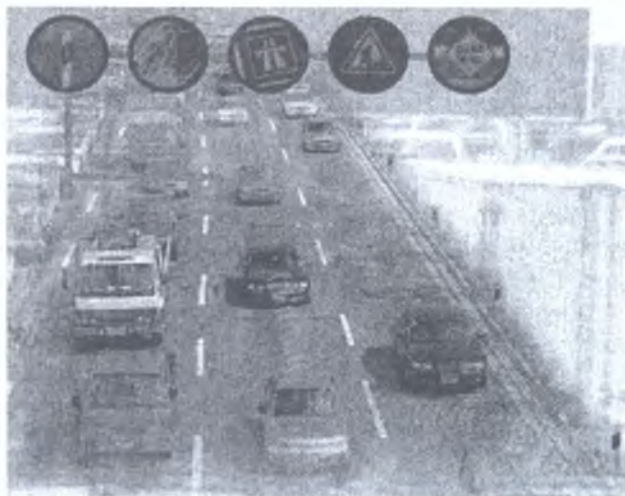


Рис. 1.14. Пример сети VANET

Сети VANET могут рассматриваться как частный случай сетей MANET, однако со следующими отличительными особенностями:

- 1) стремительные изменения топологии и частая фрагментация, что приводит к маленькому размеру эффективного сетевого диаметра;
- 2) переменный, сильно изменяющийся размер и плотность сети;
- 3) изменение поведение водителя как реакция на данные, получаемые из сети.

В свою очередь это ведет к изменениям топологии.

Рассмотрим основные приложения для автомобильных сетей.

Интеграция сетевого интерфейса, приемника глобального позиционирования, различных сенсоров и бортового компьютера представляет возможность построения мощной системы автомобильной безопасности, позволяющей собирать, обрабатывать и распространять информацию. В сети, образованной оборудованными таким образом транспортными средствами, при соответствующей инфраструктуре может быть развернуто большое количество приложений.

Все они могут относиться либо к безопасности, либо к комфорту (коммерческие).

В общем случае приложения могут быть разделены на четыре основные группы: машина—машина (car-to-car), машина—инфраструктура (car-to-infrastructure), машина—дом (car-to-home) и приложения, основанные на маршрутизации (routing based).

*Приложения, относящиеся к обеспечению безопасности* могут быть сгруппированы в три класса: помощь водителю (навигация, предотвращение столкновений и смена полос), информирование (об ограничении скорости или о зоне работ) и предупреждение (послеаварийные, о препятствиях или состоянии дороги). Одним из таких приложений могло бы стать уведомление о тревоге, например об экстренном торможении. В этом случае при дорожно-транспортном происшествии (срабатывании подушек безопасности) или внезапно резком торможении следующим сзади машинам передается уведомление. Такая же информация должна быть также получена машинами, движущимися в противоположном направлении, и автомобилями, которые потенциально могут попасть в аварию.

Другим примером может служить система совместной помощи водителю, использующая обмен данными, например, от сенсоров между машинами. Основная идея — расширение поля зрения водителя и представления дополнительной ему помощи посредством новых автономных приложений. С передачей этой информации автомобилям, следующим по той же дороге, водители получают информацию об опасности, препятствиях, транспортном потоке впереди, что в итоге приводит к эффективному и безопасному вождению.

*Коммерческие приложения* — их цель улучшить удобство пассажиров и повысить эффективность дорожного движения. Для достижения этих целей необходимо определение ближайших точек интереса (points of interest), получение информации о текущей загрузке дорог или погоде, а также интерактивная связь.

Другой пример приложений — получение данных от коммерческих транспортных средств и дорожной инфраструктуры о предоставляемых услугах (беспроводная реклама).

### 1.2.5. Гибридные сети

Локальная СРС открывает новые возможности расширения сетей мобильной связи на участке пользователя. Перемещающийся пользователь, имеющий доступ к такой сети, может пользоваться мобильным телефоном GPRS/UMTS в качестве шлюза к Интернету или корпоративной IP-сети. Что касается нагрузки в сети, то объем суммарного трафика от сети СРС обычно превышает объем трафика от мобильного телефона. Кроме того, если каждая сеть взаимодействует друг с другом, пропускная способность других сетей может быть повышена. На рис. 1.15 показан сценарий, в котором используются четыре СРС. При этом две сети PAN подсоединены к опорной IP-сети: одна — через точку доступа LAN, а вторая — через телефон GPRS/UMTS.



Рис. 1.15. Пример взаимодействия CPC

Устройства, входящие в сеть CPC, могут также использовать несколько различных технологий доступа. Например, портативный компьютер может использовать один из интерфейсов WLAN (Bluetooth, IEEE 802.11 или HiperLAN/2), обеспечивающий доступ к сети, когда компьютер находится внутри помещения. Сами принципы CPC позволяют объединять в ее рамках новые терминалы и новые технологии доступа. При этом отпадает необходимость в создании комбинированных терминалов, таких, как мобильные телефоны PDA, поскольку сеть CPC заменит собой интегрированные беспроводные устройства.

### 1.3. Преимущества и перспективы самоорганизующихся радиосетей

Основные различия в принципах построения и функционирования сотовых и самоорганизующихся сетей видны из рис. 1.16 и 1.17.



Рис. 1.16. Сотовые сети

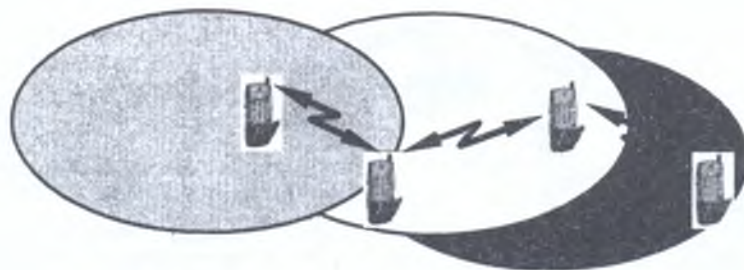


Рис. 1.17. Самоорганизующиеся радиосети

Сравнительный анализ вариантов построения сетей показывает ряд преимуществ самоорганизующихся радиосетей по сравнению с сотовыми и транкинговыми сетями (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Характеристика	Сотовые сети	Транкинговые сети	Самоорганизующиеся радиосети
Архитектура	Фиксированная сотовая: фиксированные зоны обслуживания, стационарные базовые станции	Использование фиксированной сети для соединения базовых станций	Отсутствие фиксированной инфраструктуры, каждый узел является ретранслятором (маршрутизатором) сообщений
	Использование стационарной сети общего пользования		
Тип топологии	Статичная (базовые станции статичны)		Случайная, высоко динамичная адаптация топологии к условиям функционирования
Время развертывания	Очень большое	Значительное	Быстрое развертывание, самоорганизация сети, лёгкое наращивание
	Необходим этап проектирования (планирования) сети	Необходим этап планирования сети	
Тип управления	Централизованный, наличие отдельной (выделенной) сети управления		Децентрализованный, отсутствие выделенной сети управления
Мобильность	Мобильны только абоненты в пределах зон покрытия стационарными базовыми станциями		Мобильны все элементы сети
Живучесть	Очень низкая		Очень высокая
Разведзащищенность	Низкая		Высокая
Скорость передачи	Низкая – сотни Кб/с – единицы Мб/с		Высокая, 1–54 Мб/с

Чтобы понять место СРС в ряду других технологий, рассмотрим технологии беспроводной связи, включая современные системы сотовой связи, которые в значительной степени опираются на сетевую инфраструктуру: покрытие обеспечивается базовыми станциями, управление ресурсами радиопередачи осуществляется централизованно и услуги интегрированы в систему. На рис. 1.18 приведена классификация беспроводных технологий с точки зрения двух факторов – степени централизованности управления и использования многопролетной радиопередачи информации. По мере уменьшения централизованности управления сетью или вообще отказа от него мы приближаемся к сети, которая может быть однопролетной или многопролетной.

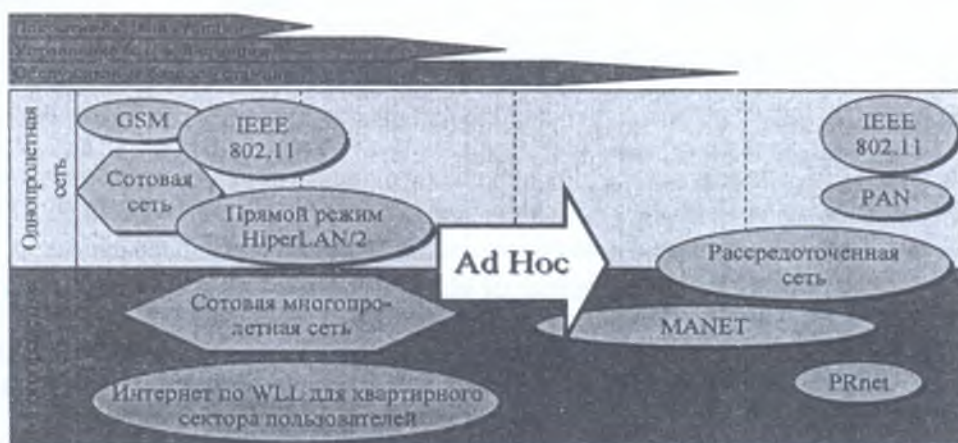


Рис. 1.18. Беспроводные сети с точки зрения степени централизованности управления (по горизонтали) и использования многопролетной радиопередачи (по вертикали)

Возможности современных беспроводных технологий и их основные параметры приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Технология	Теоретическая скорость	Частоты	Дальность	Мощность передатчика
IEEE 802.11b	1, 2, 5, 11 Мб/с	2,4 ГГц	25–100 м (внутри помещений); 100–500 м	~30 мВт
IEEE 802.11g	54 Мб/с	2,4 ГГц	25–50 м (внутри помещений)	~79 мВт
IEEE 802.11a	6, 9, 12, 24, 36, 48 и 54 Мб/с	5 ГГц	10–40 м (внутри помещений)	40 мВт, 250 мВт или 1 Вт
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	1 Мб/с (v1.1)	2,4 ГГц	10 м (максимально 100 м)	1 мВт (максимально 100 мВ)

Окончание табл. 1.6

Технология	Теоретическая скорость	Частоты	Дальность	Мощность передатчика
UWB (IEEE 802.15.3)	110–480 Мб/с	3–10 ГГц	~ 10 м	100 мВт, 250 мВт
IEEE 802.15.4 (например, Zigbee)	20, 40 или 250 Кб/с	868 МГц, 915 МГц или 2,4 ГГц	10–100 м	1 мВт
HiperLAN2	макс 54 Мб/с	5 ГГц	30–150 м	200 мВт или 1 Вт
IrDA	макс 4 Мб/с	Инфракрасный (850 нм)	–10 м (прямая видимость)	Определяется расстоянием
HomeRF	1 Мб/с (v1.0), 10 Мб/с (v2.0)	2.4 ГГц	–50 м	100 мВт
IEEE 802.16 IEEE 802.16a IEEE 802.16e (Broadband Wireless)	134 Мб/с, 75 Мб/с up to 15 Мб/с	10–66 ГГц < 11 ГГц < 6 ГГц	2–5 км 7–10 км (максимально 50 км) 2–5 км	Управление мощностью

Уже сейчас можно привести примеры использования беспроводных локальных и городских сетей, которые основываются на использовании протоколов IEEE 802.11, HiperLAN2, Bluetooth и др. Дальнейшее развитие беспроводных технологий предусматривает введение сети MANET как составной сетей связи четвертого поколения 4G – так называемые сотовые/самоорганизующиеся (гибридные) сети (рис. 1.19).

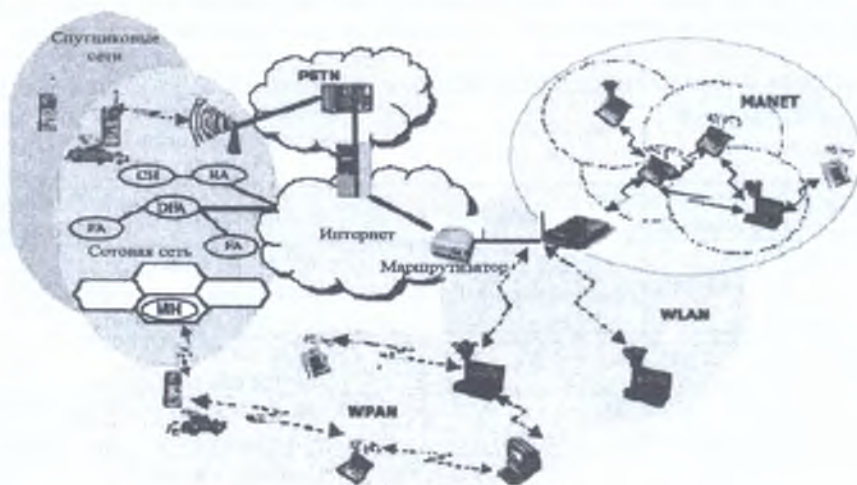


Рис. 1.19. 4G сети



## 1.4. Выводы

Одним из перспективных направлений развития четвертого поколения сетей связи является создание и развитие самоорганизующихся радиосетей.

Данные сети применяются в качестве:

- 1) сетей радиосвязи военного назначения (в основном тактического уровня);
- 2) сетей, создаваемые в условиях природных катаклизмов, а также при выходе из строя сетей общего пользования;
- 3) сетей аварийных и муниципальных служб;
- 4) сетей телеметрии (сенсорные сети), предназначенные для мониторинга и передачи параметров окружающей среды (военного, промышленного, аграрного, природного и домашнего применения);
- 5) сетей, создаваемых при проведении конференций, соревнований, олимпиад и т.п.;
- 6) сетей обучения и игровые сети;
- 7) автомобильных сетей;
- 8) коммерческих сетей и др.

К основным параметрам СРС можно отнести: количество и мобильность узлов сети, размеры сети (географической территории) и плотность размещения узлов; связность; сетевую топологию, тип трафика и особенности внешней среды.

Самоорганизующиеся радиосети характеризуются:

- динамичной топологией (узлы сети мобильны, подвержены уничтожению и отказам; каналы радиосвязи нестабильны, ограничены по дальности связи и пропускной способности из-за помех, условий распространения радиоволн и т.д.);
- ограниченной энергетической возможностью узлов, оснащенных батареями;
- различной размерностью (десятки, сотни и тысячи узлов);
- неоднородностью по мощности передачи и мобильности (отдельный абонент, транспортное средство, вертолет, самолет);
- ограниченной безопасностью из-за широкополосной природы радиоканала и др.

Узлы самоорганизующейся радиосети должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления сетью. Анализ и разработке эффективных методов и алгоритмов управления посвящены последующие главы книги.

## Список литературы

1. Дымарский Я.С., Крутжкова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. — М.: НТЦ "Мобильные коммуникации", 2003. — 384 с.
2. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 288 с.

3. Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc. of the IEEE. – 1978. – 66. – P. 1468–1496.
4. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. – К.: Техніка, 1989. – 223 с.
5. Эфремидес Э., Уизелтир Д.Э., Бейкер Д.Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР. – 1987. – 75, № 1. – С. 68–90.
6. Fifer W., Bruno F. The Low-Cost Packet Radio // Proc. of the IEEE – 1987. – 75 (1). – P. 33–42.
7. Sharret I.P. WIN-T—The Army's New Tactical Intranet // IEEE MILCOM. – 1999. – P. 45.04.01–45.04.05.
8. Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2002. – 384 с.
9. Freebersyser J., Leiner B. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks // Ad Hoc Networking. – 2001. – 25. – P. 147–152.
10. Sass P. Communications Networks for the Force XXI Digitized Battlefield // ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications Journal. – 1999. – 4. – P 450–455.
11. Міночкін А.І., Романюк В.А. Архітектура перспективної мобільної компоненти тактичних мереж зв'язку збройних сил України // 36. наук. праць. – К.: ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2004. – № 5. – С. 107–115.
12. Жук О.В., Міночкін А.І., Романюк В.А. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // 36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2007. – № 2. – С. 111–119.
13. Ілюшко В.М., Нарытник Т.Н. Система передачі даних на базі висотного беспилотного летального апарату (СПД Фазтон) // Зв'язок. – 2004. – № 7. – С. 38–39.
14. Міночкін А.І., Романюк В.А. Методи множественного доступу в мобільних радіосетях // Там же. – 2004. – № 2. – С. 46–50.
15. Sichertiu M.L. Wireless mesh networks: opportunities and challenges / Sichertiu M.L. // Proc. of the Wireless World Congress. – 2005. – P. 263–268.
16. Akyildiz F., Wang X. A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine. – 2005. – 43, N 9. – P. 412–418.
17. Міночкін А.І., Романюк В.А. Методологія оперативного управління мобільними радіосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53–58.
18. Міночкін А.І., Романюк В.А. Маршрутизація в мобільних радіосетях – проблема и пути ее решения // Там же. – 2006. – № 3. – С. 42–50.
19. Ramachandram K.N., Buddhikot M.M., Miller S. On design and implementation of infrastructure mesh networks // Proc. of WiMesh'05. – 2005. – P. 785–790.
20. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // 36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 3. – С. 55–65.
21. Міночкін А.І., Романюк В.А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17–23.
22. Salem N.B., Hubaux J.-P. Securing Wireless Mesh Networks // IEEE Wireless Communications. – 2006. – 13, N 2. – P. 625–631.

23. *Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В.* Виявлення атак в мобільних радіомереж // 36. наук. праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2005. – № 1. – С. 102–111.
24. *Бунин С.Г., Міночкін А.И., Романюк В.А.* Перспективы беспроводных ячеистых сетей // Зв'язок. – 2007. – № 5. – С. 20–24.
25. *Міночкін А.І., Романюк В.А.* Методологія управління тактичними сенсорними мережами // IV Наук.-практ. конф. ВІТІ "Проблеми телекомунікацій". – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ", 2008. – С. 15–26.
26. *Кучерявий Е.А., Винель А.В., Ярцев С.В.* Особенности развития и текущие проблемы автомобильных сетей VANET // Электросвязь. – 2009. – № 1. – С. 24–28.