

ПЕРСОНАЛЬНЫЕ СЕТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА стандарта ECMA-387

В.Вишневский, д.т.н.
С.Фролов
И.Шахнович

Мы продолжаем рассказ о системах передачи информации в диапазоне 60 ГГц [1]. Новая статья посвящена стандарту Европейской ассоциации по стандартизации информационных и вычислительных систем ECMA-387. Отметим, что хоть ассоциация и называется «европейской», но с Европой ее связывает в основном штаб-квартира в Женеве. Например, среди ее 18 «ординарных» членов (т.е. компаний с правом голоса) – лишь одна европейская компания, Philips. Да и среди ассоциативных членов доля европейских компаний не больше. А так в основном компании США (Intel, AMD, IBM, HP, Avaya...) и Японии (NEC, Toshiba, Fujitsu, Canon, Hitachi...), а также южнокорейская Samsung. Поэтому стандарты этой ассоциации заслуживают самого пристального внимания. Это периодически подтверждает и Международная организация по стандартизации (ISO), утверждая стандарты ECMA как стандарты ISO.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ECMA-387

Спецификация ECMA-387 (High Rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL) в первой редакции была утверждена в декабре 2008 года как стандарт для высокоскоростной связи на малых расстояниях в безлицензионном диапазоне 60 ГГц [2]. Почти через год этот документ был одобрен ISO и опубликован 15 ноября 2009 года как общемировой стандарт ISO/IEC 13156. Он специфицирует протоколы физического и MAC-уровней* для персональных

* MAC-уровень (Medium Access Control) – уровень управления доступа к среде передачи, подуровень канального уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем.

сетей в диапазоне 60 ГГц, предназначенных как для передачи данных безотносительно их природы, так и высокоскоростных мультимедийных потоков, включая потоки HDMI. Устройства этого стандарта могут использоваться для трансляции несжатых видеопотоков высокого разрешения, как беспроводные док-станции или высокоскоростные интерфейсы связи устройств на коротких дистанциях. Кроме того, стандарт отдельно оговаривает взаимодействие с интерфейсом HDMI, как с одним из основных приложений более высокого уровня для сетей в диапазоне 60 ГГц.

Учитывая широкий спектр возможных задач, стандарт в пер-

вой редакции предусматривает три типа устройств (А, В и С). Устройства типов А и В служат для передачи видеопотоков и данных, тогда как устройства типа С ориентированы на короткие беспроводные интерфейсы систем передачи данных (не чувствительные к задержкам).

Тип А объединяет устройства, предназначенные для работы на расстояниях до 10 м в условиях как прямой видимости (LOS), так и вне прямой видимости (NLOS) с переотраженными сигналами. Они используют перестраиваемые направленные антенные системы на основе фазированных антенных решеток (ФАР) или секторные

антенны. Класс А – это наиболее мощные и совершенные устройства сети ЕСМА-387.

Тип В – менее мощные устройства, с радиусом действия 1–3 м. Они могут оснащаться направленными секторными антеннами, но без возможности их динамической перестройки. Устройства типа В предназначены для организации соединений исключительно в условиях прямой видимости. Упрощение устройств типа В – это плата за пониженное энергопотребление и стоимость.

Тип С – наиболее маломощные устройства, предназначенные для организации каналов связи на расстояниях менее 1 м. Они также лишены возможности подстройки своих антенных систем. Кроме того, обмен с этими устройствами наиболее низкоприоритетен, т.е. не может быть никаких гарантий качества услуг (QoS). Но это – наименее энергоемкие и самые дешевые устройства, предназначенные, например, для беспроводного доступа к системам хранения информации.

В единой сети возможна одновременная работа и взаимодействие устройств любых типов. Более того, устройства любого типа самодостаточны, т.е. сеть может состоять только из устройств типа А, В или С. Но устройства более "высокого" типа выступают управляющими по отношению к устройствам "нижнего" типа. Важно подчеркнуть, что мы основываемся на положениях первой (и единственной утвержденной на сегодня) редакции стандарта ЕСМА-387 [2]. Однако во второй редакции очень вероятен отказ от устройств типа С, а их возможности дополняют устройства типа В [3].

Сам по себе стандарт достаточно подробен и разнообразен, что не удивительно – ведь описывается гетерогенная, в общем случае, сеть. Причем предназначенная для передачи потокового видео, т.е. с высокими требованиями к QoS. Более того – сеть, работающая в нелицензионном диапазоне, где всегда возможна интерференция с "чужими" устройствами. Помимо работы в диапазоне 60 ГГц, стандарт допускает применение "внеполосового" управляющего канала в диапазоне 2,4 ГГц на основе протокола IEEE 802.11g. Еще одна

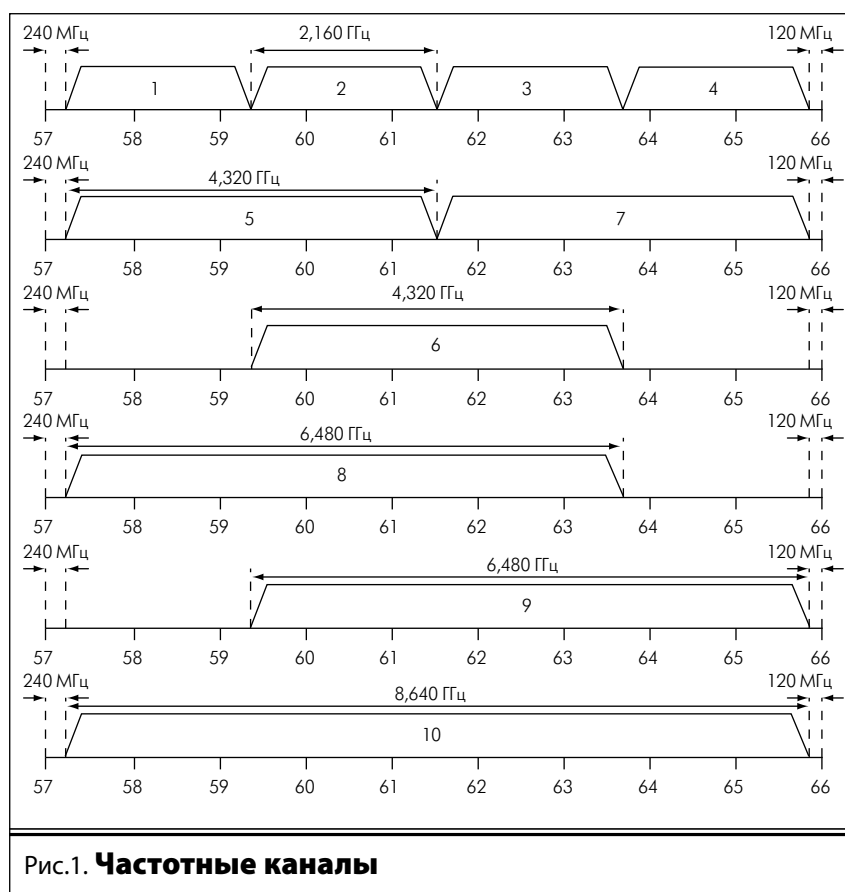


Рис.1. Частотные каналы

принципиальная особенность – возможность ретрансляции сообщений, т.е. между узлом-источником данных и узлом-приемником оказывается ретрансляционный узел. Это удобно при экранировании одного из устройств, например человека.

Мы не ставим задачу даже бегло рассказать о всех особенностях нового стандарта, отметим лишь некоторые его базовые принципы и особенности.

ФИЗИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

Стандарт ЕСМА-387 предусматривает работу в четырех смежных частотных каналах шириной 2160 МГц каждый в диапазоне 57,24–65,88 ГГц (рис.1). Устройство должно работать в любом из этих каналов. Каналы могут объединяться – для достижения больших скоростей или увеличения дальности работы/надежности передачи. Каждый канал, в том числе объединенный, имеет свой уникальный номер (от 1 до 10) (см. рис.1). Канал 3 применяется в качестве так называемого поискового канала (Discovery Channel). Он может использоваться и для передачи данных, но только если не нужен

для обмена поисковыми пакетами и подстроечными последовательностями. Скорость передачи модуляционных символов в каждом канале фиксирована и составляет 1,728 Гсимволов/с.

Устройства типа А используют два метода передачи – одночастотную блоковую передачу (SCBT – Single Carrier Block Transmission) с циклическим префиксом и мультиплексирование посредством ортогональных несущих (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Циклический префикс в схеме SCBT аналогичен защитному интервалу при OFDM и служит для борьбы с межсимвольной интерференцией при многолучевом распространении сигнала (переотраженный паразитный сигнал попадает в интервал циклического префикса).

Один SCBT-блок включает 256 модуляционных символов, из них четыре пилотных, остальные – информационные. Кроме того, к блоку может добавляться циклический префикс длиной 0, 32, 64 или 96 символов. Частота передачи символов – 1,728 Гсимволов/с, соответственно общая длительность SCBT-блока – от 148,148 до 203,707

Таблица 1. Режимы работы устройств типа А при использовании одного частотного канала (1–4). Базовая скорость приведена при нулевых длинах циклических префиксов (кроме OFDM). При объединении каналов базовая скорость умножается на число каналов (возможно только в режимах SCBT)

Режим	Базовая скорость, Гбит/с	Схема передачи	Модуляция	Кодирование	Скорость сверточного кодирования	Минимально допустимый уровень сигнала в приемнике**, дБм
A0	0,397	SCBT	BPSK	RS и CC	1/2	-60,0
A1	0,794		BPSK	RS и CC	1/2	-57,0
A2	1,588		BPSK	RS	1	-50,5
A3	1,588		QPSK	RS и CC	1/2	-53,9
A4	2,722		QPSK	RS и CC	6/7	-49,8
A5	3,175		QPSK	RS	1	-47,4
A6	4,234		NS8QAM	RS и TCM	5/6	-45,7
A7	4,763		NS8QAM	RS	1	-43,5
A8	4,763		TCM-16QAM	RS и TCM	2/3	-43,5
A9	6,350		16QAM	RS	1	-40,7
A10*	1,588		QPSK	RS и UEP-CC	$R_{MSB}: 1/2$	-53,9
A11	4,234		16QAM	RS и UEP-CC	$R_{MSB}: 4/7, R_{LSB}: 4/5$	-43,5
A12	2,117		UEP-QPSK	RS и CC	2/3	-52,3
A13	4,234	UEP-16QAM	RS и CC	2/3	-43,5	
A14	1,008	OFDM	QPSK	RS и CC	1/3	-60,4
A15	2,016		QPSK	RS и CC	2/3	-54,3
A16	4,032		16QAM	RS и CC	2/3	-50,2
A17	2,016		QPSK	RS и UEP-CC	$R_{MSB}: 4/7, R_{LSB}: 4/5$	-56,0
A18	4,032		16QAM	RS и UEP-CC	$R_{MSB}: 4/7, R_{LSB}: 4/5$	-52,0
A19	2,016		UEP-QPSK	RS и CC	2/3	-54,3
A20	4,032		UEP-16QAM	RS и CC	2/3	-50,2
A21*	2,016		QPSK	RS и CC	$R_{MSB}: 2/3$	-54,3

* Режимы A10 и A21 предусматривают передачу только четырех старших битов каждого байта, младшие четыре бита отбрасываются передатчиком.

**Здесь и в табл.2, 3 – при интенсивности пакетных ошибок (PER) менее 8% и длине поля данных 2048 байт.

нс в зависимости от наличия и длины циклического префикса.

В режиме OFDM используются 512 номинальных поднесущих, из них 360 информационных и 16 пилотных. Частота OFDM-символов – 2,592 Гсимволов/с, длина циклического префикса – 64 модуляционных символа (всегда), общая длительность OFDM-символа – 222,23 нс.

Предусмотрен один обязательный режим передачи (A0) и еще 21 опциональный режим типа А (табл.1). Сигнально-кодовые конструкции, используемые устройствами стандарта ECMA-387, достаточно разнообразны – от BPSK (1 бит на модуляционный символ) до 16-QAM (4 бита на символ). Применяются блоковое кодирование Рида-Соломона RS(255,239), сверточное кодирование (CC),

модуляцию решетчатым кодом (TCM). Используется и неравное кодирование (UEP), когда младшие (LSB) и старшие (MSB) 4 бита каждого байта кодируются с различной скоростью при сверточном кодировании. Для различных режимов схемы кодирования различны (см. табл.1). Из особенностей отметим поворот сигнальных созвездий (диаграмм Грея) для четных и нечетных символов в режимах BPSK, UEP-QPSK и NS8QAM (рис.2).

Существенно, что в стандарте ECMA-387 сверточное кодирование распараллелено. Если используется схема неравного кодирования (UEP) для старших и младших 4 бит каждого байта, поток данных разбивается на два (для младших и старших тетрад), каждый из них скремблируется и кодируется бло-

ковым кодером Рида-Соломона (рис.3). Затем потоки кодовых слов разбиваются на восемь подпотоков. В параллельных подпотоках биты подвергаются перемежению (интерливингу) и кодируются сверточным/решетчатым кодом. Затем подпотоки мультиплексируются в общий поток, из которого формируются модуляционные символы.

Если используется равное кодирование (режимы A0-A9) в режиме SCBT, предварительного разбиения на два потока нет, параллельно обрабатывается четыре подпотока (одна из ветвей схемы на рис.3). В случае OFDM (режимы A14-A21) обработка также происходит параллельно в восьми подпотоках. Все это необходимо, поскольку скорости потока данных чрезвычайно высоки и последовательная обработка проблематична.

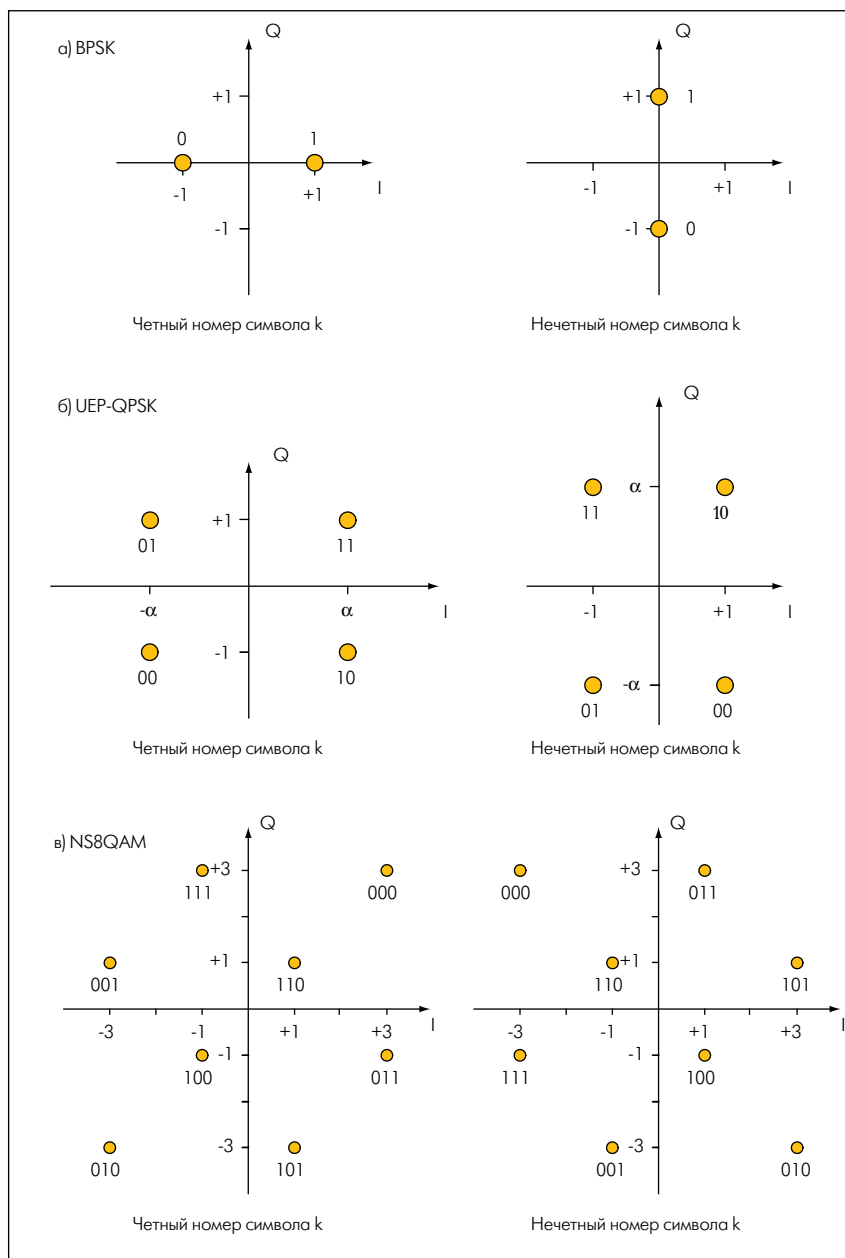


Рис.2. Особенности сигнальных созвездий:
а – BPSK, б – UEP-QPSK и в – NS8QAM

Устройства типа В и С работают только в одночастотном режиме (SC). Циклический префикс отсутствует (поскольку устройства В/С предназначены для работы только при прямой видимости, без переотражений), сверточного кодирования нет. Предусмотрен один обязательный (В0) и четыре опциональных режима типа В (табл.2).

Для устройств типа С также предусмотрен один обязательный (С0) и два опциональных режима (табл.3). Объединение каналов не допускается. Используются простейшие схемы модуляции одной

несущей типа ООК ("включить-выключить"), 1 бит на символ и схема модуляции с четырехпозиционным амплитудным сдвигом 4-ASK (2 бита на символ) (рис.4).

Подчеркнем – для каждого типа устройств предусмотрен обязательный режим (А0, В0 и С0), причем без возможности объединения каналов. В обязательных режимах каждый модуляционный символ передается дважды – поэтому и базовая скорость меньше вдвое, чем в соответствующих режимах А1, В1 и С1. Более того, устройства "старшего" типа поддерживают обязательно режимы младших типов, а опционально – их опциональные режимы. Так, устройства типа А обязательно поддерживают режимы А0, В0 и С0. Опционально они работают во всех режимах: А0–А21, В1–В3, С1 и С2. Устройства типа В обязательно поддерживают режимы В0 и С0, а также режим передачи А0 (в одном канале). Опционально они работают в режимах В0–В3 с возможным объединением каналов, а также в режимах С1 и С2.

Таким образом, устройства типа А могут работать, с учетом опциональных режимов, в диапазонах скоростей передачи данных от 0,4 до 25,4 Гбит/с, типа В – от 0,8 до 12,7 Гбит/с. Разумеется, максимальные скорости достигаются при объединении всех четырех каналов (работа в канале 10, рис.1).

КАДРОВАЯ СТРУКТУРА КАНАЛА

Данные в канале передаются посредством кадров физического уровня. Кадр в общем случае состоит из четырех частей – преамбулы, заголовка, поля данных и антенной подстроечной последова-

Таблица. 2. Режимы работы устройств типа В при использовании одного частотного канала (1–4). При объединении каналов базовая скорость умножается на число каналов

Режим	Базовая скорость, Гбит/с	Схема модуляции	Минимально допустимый уровень сигнала в приемнике, дБм
В0	0,794	DBPSK	-60,7
В1	1,588	DBPSK	-57,7
В2	3,175	DQPSK	-54,6
В3	3,175	UEP-QPSK	-54,6
В4	3,175	DAMI	-58,6

Таблица 3. **Режимы работы устройств типа С**

Режим	Базовая скорость, Гбит/с	Модуляция	Минимально допустимый уровень сигнала в приемнике, дБм
C0	0,8	OOK	-62,2
C1	1,6	OOK	-57,0
C2	3,2	4ASK	-53,5

тельности (ATS) (рис.5). Преамбула включает синхронизирующую последовательность и последовательность оценки канала. Преамбула нужна для синхронизации приемника, коррекции сдвига частот и оценки условий передачи в канале. Заголовок содержит основную информацию о передаваемом кадре, включая сведения о передаваемых данных. По сути, он описывает содержимое поля данных, ук-

мом передачи (A0–A21, B0–B4, C0–C2). При формировании кадров физического уровня пакеты MSDU могут разбиваться на блоки данных. Или напротив, последовательные MSDU с одинаковым режимом передачи можно объединять в один блок данных. Блоки данных преобразуют в модуляционные символы в соответствии с выбранным режимом передачи и добавляют к каждому из них под-

разного типа, что подробно изложено в [2]. Подстроечные антенные последовательности (последовательности Франка-Задова) включаются по запросу в кадры устройств типа А (обязательно) и опционально – в кадры устройств типа В.

MAC-УРОВЕНЬ

MAC-уровень в стандарте EBCA-387 разработан на основе MAC-уровня стандарта EBCA-368 [4]**, однако с учетом ряда особенностей, прежде всего – направленности передачи потоков данных в диапазоне 60 ГГц.

Процедуры MAC-уровня в стандарте EBCA-387 служат для доступа устройств к среде передачи, обеспечения их взаимодействия и одновременной работы без взаимного негативного влияния,

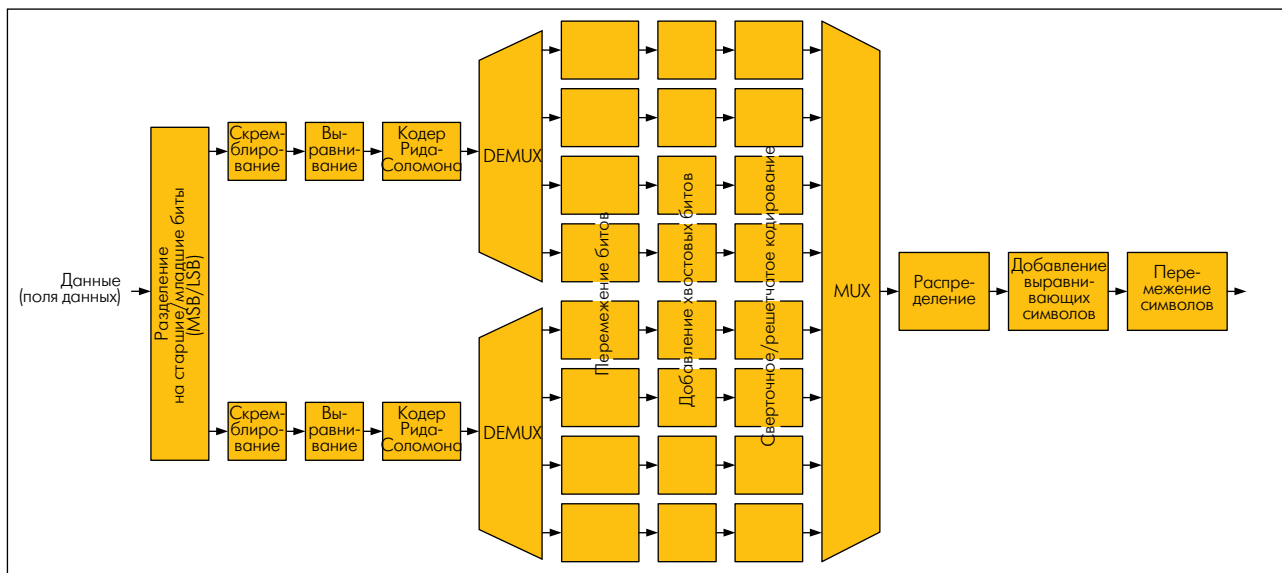


Рис.3. **Параллельная обработка поля данных (схема передачи SCBT)**

зывая методы кодирования и передачи различных его сегментов и т.п. Подстроечная последовательность используется устройствами типа А для настройки их антенных массивов. Кроме того, в заголовках кадров физического уровня передаются заголовки кадров MAC-уровня.

Поле данных кадра физического уровня состоит из набора сегментов. Физический пакет формируется на основе кадра MAC-уровня (рис.6). Кадр MAC-уровня, в общем случае, состоит из MAC-заголовка и поля данных, содержащего последовательность пакетов различных приложений (MSDU). Каждый такой пакет MSDU (или его часть) может отличаться режи-

строечную последовательность Midamble*, в результате образуется сегмент. В физических кадрах устройств типа С может передаваться только один сегмент.

Таким образом, поле данных кадра физического уровня содержит набор сегментов, каждый из которых может передаваться в отдельном режиме. Сведения о каждом из этих сегментов содержатся в заголовке. Отметим, что преамбулы и отдельные поля заголовков различны для устройств

* Термин Midamble на русский перевести затруднительно, это "преамбула посередине" – может быть, мидамбула? Она нужна для тонкой подстройки частоты и временной синхронизации.

для управления энергопотреблением устройств, а также для защиты передаваемой информации. Функциональность устройств различных типов на MAC-уровне также различна.

** Это стандарт сверхширокополосной связи по технологии MB-OFDM, разработанный консорциумом WiMedia Alliance – международной организации, в 2005 году официально объединившейся в альянсом MBOA. Технология предлагалась для стандарта IEEE 802.15.3a, так и не созданного из-за расхождения мнений участников данной рабочей группы. Комитет IEEE 802.15.3a официально распался в 2006 году. В результате члены WiMedia Alliance стандартизировали технологию сначала как EBCA-368 (первая редакция – декабрь 2005 года), а позднее – как ISO/IEC 26907 (март 2007 года).

Каждое устройство распознается с помощью 16-разрядного адреса. Адреса назначаются локально, в рамках одной сети, поэтому возможно появление двух устройств с одинаковым адресом. Стандарт предусматривает специальный механизм выявления и разрешения подобных ситуаций (устройство генерирует новый адрес). Адреса могут быть индивидуальными, групповыми и широковещательными (пакет с таким адресом предназначен всем устройствам). Предусмотрены еще так называемые приватные адреса (0–255), используемые для устройств с особым режимом резервирования канальных ресурсов.

Работа устройств в одной зоне радиопокрытия координируется посредством посылки/приема специальных управляющих кадров – биконов, а также дополнительных контрольных кадров. Периодическая рассылка биконов обеспечивает временную синхронизацию в сети, ее динамическую самоорганизацию, резервирование каналов передачи и распространение расписания для доступа к среде передачи.

При обмене данными базовая временная структура для любого устройства – суперкадр (рис.7). Суперкадр разбит на 256 слотов доступа MAS (Medium Access Slot) длительностью 64 нс каждый. MAS – это минимальная временная единица, которая распределяется между устройствами при работе в канале. Суперкадр состоит из двух

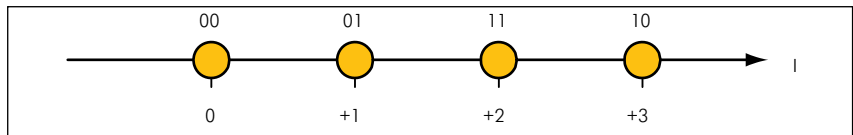


Рис.4. Сигнальное созвездие при модуляции 4-ASK

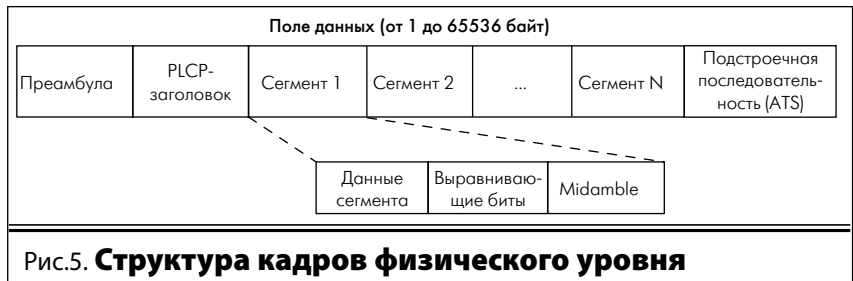


Рис.5. Структура кадров физического уровня

основных частей – поле биконов (BP – Beacon Period) и поле кадров данных. Момент начала суперкадра – это параметр, подлежащий синхронизации между взаимодействующими устройствами. Устройства, использующие один момент начала суперкадра, называются биконной группой. Длительность поля биконов – это постоянно изменяемый параметр, зависящий от длин биконов всех устройств биконной группы. Во избежание коллизий каждое устройство периодически пропускает передачу бикона и слушает канал – не пытается ли в это время передать бикон соседнее устройство.

Бикон, как и любой MAC-кадр, состоит из заголовка и поля данных (рис.8). Заголовок включает такие информационные поля, как тип кадра (данные, управляющий, бикон и т.д.), адрес устройства-

источника и устройства-получателя, длительность кадра и т.п. Поле данных содержит поле параметров бикона и последовательность управляющих команд – информационных элементов IE. С помощью информационных элементов бикона и реализуются основные функции управления сетью ECMA-387. Поэтому поле биконов в суперкадре особо защищено, биконы можно передавать только в обязательных режимах (A0, B0 и C0), какие-либо передачи во время BP запрещены и т.п.

В поле параметров бикона указывается идентификатор устройства (назначается производителем, может не использоваться), номер слота бикона в BP, а также набор параметров. Для нас важно, что в этом поле передается статус устройства (по сути, назначение соответствующего бикона).

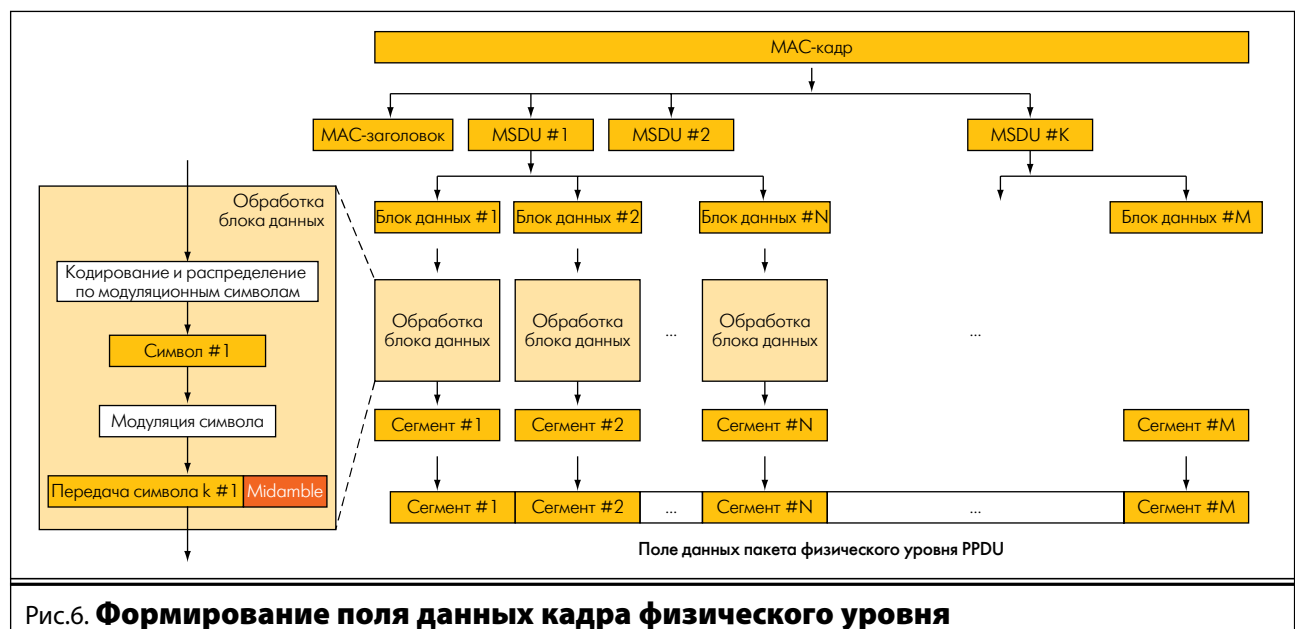


Рис.6. Формирование поля данных кадра физического уровня

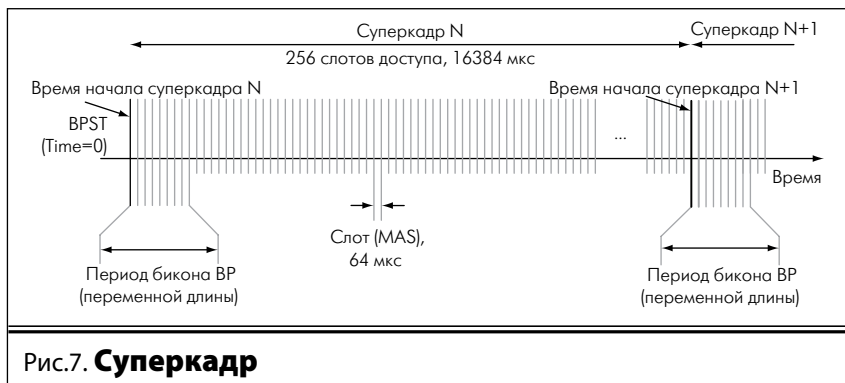


Рис.7. Суперкадр

МЕХАНИЗМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ DRP

В поле данных кадры передаются на основе механизма распределенного резервирования DRP (distributed reservation protocol). В результате обмен кадрами данных происходит по заранее согласованному расписанию, что исключает коллизии и гарантирует QoS. Ресурсы резервируются на основе обмена биконами. Каждое устройство включает в свой бикон специальную команду, в которой указывает зарезервированные слоты суперкадра (256-битное сообщение, где каждый бит соответствует определенному MAS суперкадра).

Устройство, зарезервировавшее MAS, называется владельцем резерва. Резервированный слот однозначно определяется его номером в суперкадре, адресами источника/приемника информации, адресом владельца резерва, номером антенного канала, типом резервирования и индексом потока данных, для которого предназначен данный слот. Стандарт предусматривает несколько типов резервирования. Из них основные – жесткое и мягкое резервирование. В первом случае доступ к зарезервированным слотам имеют только владелец резерва и адресуемое устройство. При мягком типе резервирования в зарезервированных слотах могут передавать все устройства на основании механизма конкурентного доступа, однако владелец резерва обладает приоритетом.

Еще один примечательный тип резервирования – резервирование внешних ВР. Если устройство обнаруживает биконы других устройств и по каким-то причинам не хочет включать их в ВР своего суперкадра, оно может защитить их, зарезервировав MAS, на кото-

рые приходится эти внешние ВР (т.е. как бы изолировав их).

ВХОЖДЕНИЕ В СЕТЬ

Доступ к среде передачи организован на основе пространственного (направленные антенны), частотного (частотные каналы) и временного разделения. Сразу после включения любое устройство ЕСМА-387 начинает процедуры вхождения в сеть. Прежде всего, оно начинает поиск других устройств. Для этого предусмотрено три механизма – прием/передача поисковых биконов в поисковом канале Discovery Channel, обмен подстроечными последовательностями в Discovery Channel и обмен управляющими кадрами (в любых каналах).

Для процедур поиска, подстройки антенных систем и команд выбора частотных каналов предназначен отдельный канал Discovery Channel (канал 3). Он может использоваться и для передачи данных, в том числе при объединении частотных каналов. Однако должен немедленно освобождаться для задач поиска и управления. В Discovery Channel, если он не

используется для передачи кадров данных, работа строится на основе конкурентного доступа по стандартной технологии CSMA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий, как, например, в стандартах группы IEEE 802.11).

Поскольку существует иерархия устройств в зависимости от их типа, процедуры вхождения в сеть для устройств типа А, В и С различны. Устройство типа А в течение суперкадра прослушивает все каналы, включая Discovery Channel, пытается обнаружить биконы других устройств (типа А0 и В0 или С0). Если они обнаружены, устройство посылает свои биконы в ВР, указанном в принятом биконе. С устройствами типа В и С устройство А работает в режиме "мастер-ведомый", рассылая управляющие кадры и биконы.

Если во всех каналах активность не обнаружена, устройство типа А само начинает посылать поисковые запросы. Для поиска устройств типа А предназначен особый режим – D0. Это режим всенаправленной рассылки поисковых биконов, причем каждый элемент такого пакета повторяется 128 раз, чтобы гарантировать прием без подстройки антенной системы. При поиске устройства типа А передается в Discovery Channel так называемые поисковые блоки (рис.9). Поисковый блок включает биконы со статусом "Поиск" в стандартных режимах D0, В0 и С0. Поисковые биконы в режимах В0 и С0 называются кадрами поллинга (запроса), поскольку устройство А выступает по отношению к этим устройствам

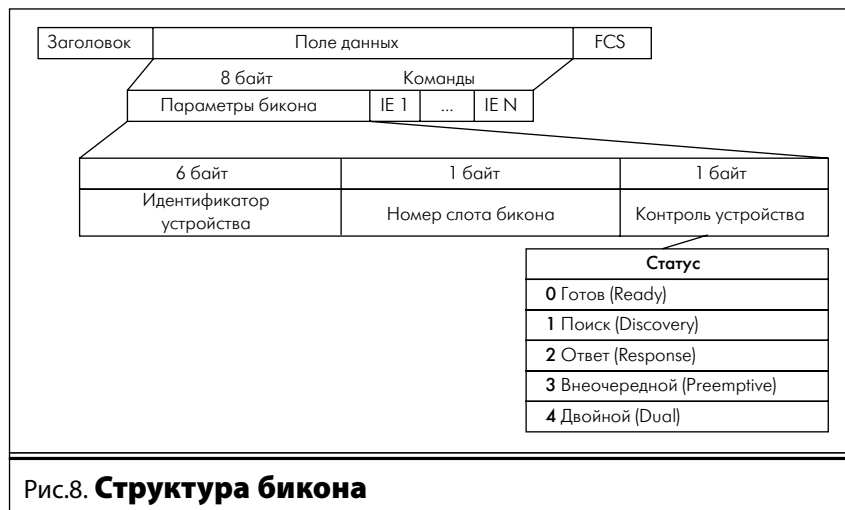


Рис.8. Структура бикона

как "мастер". В каждом поисковом блоке должно быть столько кадров поллинга каждого типа, сколько антенных секторов (или переключаемых направлений луча) используется для покрытия всей рабочей зоны.

Отправив поисковый блок, устройство прослушивает Discovery Channel на предмет возможного ответа. Если получен ответ от устройства типа А, в Discovery Channel между этими устройствами начинается процедура обмена подстроечными последовательностями для согласования параметров их антенных систем (ФАР). После чего устройства согласовывают разделение ресурсов – выбирают каналы обмена, распределяют временные слоты и т.п. Если ответ получен от устройств типа В/С, устройство А перехватывает управление и модифицирует структуру суперкадра под свои потребности.

Если устройству не удалось обнаружить никакой активности ни в одном из каналов, и оно не получило ответы на свои запросы в поисковом канале, оно формирует свой суперкадр и ожидает появления еще хотя бы одного устройства, периодически повторяя процедуру поиска в Discovery Channel. Более того, даже при передаче данных устройство типа А должно периодически переключаться на Discovery Channel и проводить поиск новых устройств.

Устройство типа В при вхождении в сеть не может рассылать поисковые пакеты типа D0. Аналогично устройству типа А, оно сканирует все каналы, включая Discovery Channel. Если обнаружен бикон от устройства типа А, устройство типа В может включиться в суперкадр данного устройства, послав ему соответствующий бикон со статусом "Ответ". Зачастую устройство типа В по принятому бикону не может определить, кто его отправил – устройство типа А или В. Поэтому для включения в его суперкадр оно посылает два смежных бикона – типа В0 и вслед за ним – типа А0. Аналогично устройству типа В поступает, если ни одного устройства в канале не обнаружено и оно само организует суперкадр.

Устройство типа С может только слушать каналы в поисках других устройств. Если устройств типа А

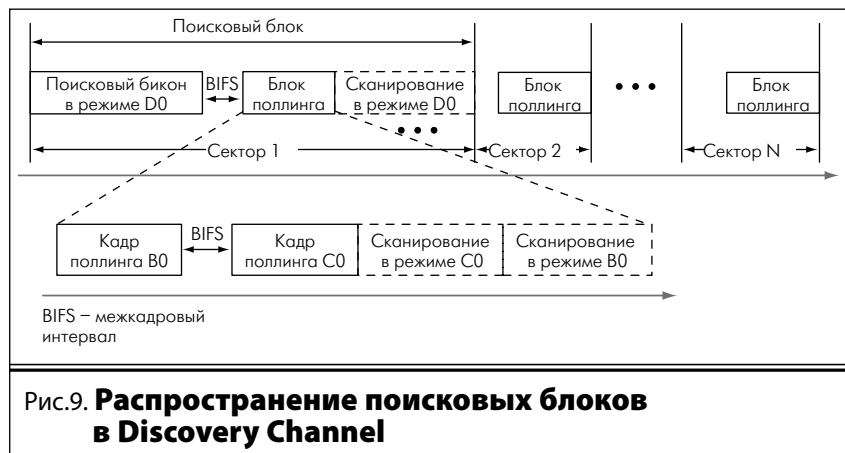


Рис.9. Распространение поисковых блоков в Discovery Channel

или В не обнаружено, оно ищет мастер-устройство типа С. Если и его нет, оно ждет появления другого устройства.

НАСТРОЙКА АНТЕННЫХ СИСТЕМ

После того, как устройства типа А нашли соседей, они подстраивают свои антенные системы и выбирают оптимальный канал для передачи данных. Для точной подстройки диаграмм направленности ФАР в приемной и передающей станциях предусмотрен специальный протокол подстройки и наведения АТТР (Antenna Training and Tracking Protocol), включающий обмен специальными подстроечными последовательностями. Протокол ориентирован на ФАР, включающие до 36 антенных элементов, а также на согласование работы разнородных антенн. Процедуры подстройки могут выполняться даже на фоне обмена данными. Отметим, что хотя устройства типа В не оснащены подстраиваемыми антенными системами, они могут по запросу передавать подстроечные последовательности устройствам типа А. Все процедуры подстройки антенн выполняются в Discovery Channel. Во избежание коллизий, перед началом обмена подстроечными последовательностями устройства обмениваются командами Request To Train (запрос для подстройки) – Clear To Train (готовность к подстройке).

Для передачи подстроечных последовательностей в кадрах физического уровня предусмотрены специальные поля АТС (см. рис.5). При подстройке возможен режим с обратной связью и без. В первом случае устройство подстраивает весовые коэффициенты цифровых фильтров в передающей антенне

(ФАР) на основе данных обратной связи от другого устройства. При работе без обратной связи используются одинаковые параметры для приемной и передающей антенн.

ВЫБОР ЧАСТОТНОГО КАНАЛА

Когда устройства типа А/В обнаружили другие устройства (после обмена в Discovery Channel), и они подстроили свои антенные системы, необходимо выбрать канал для обмена данными и согласованно переключиться на него. Все процедуры выбора канала проводятся в Discovery Channel в режиме конкурентного доступа.

Стандарт предусматривает процедуру явного и неявного выбора канала. При явном (explicit) выборе канала устройство посылает вновь обнаруженным устройствам команду запроса сканирования канала, указывая номера интересующих его каналов и длительность сканирования. Получив подтверждение о приеме запроса, устройство само, одновременно с запрошенным устройством, начинает сканировать каналы. Через оговоренное время устройство вновь переключается на Discovery Channel и принимает ответы соседнего устройства о состоянии каналов. В ответе содержится информация о каждом слоте MAS суперкадра – зарезервирован он или нет. На основании этой информации устройство посылает команду выбора канала. В ответ запрошенное устройство должно подтвердить возможность такого переключения. Если решение положительно, через некий промежуток времени оба устройства приступают к обмену в выбранном канале.

Устройство может инициировать процедуру сканирования и смены канала и в процессе передачи дан-

ных – неявный (implicit) выбор канала. В этом случае инициатор смены канала, после процедуры сканирования канала, посылает в своем регулярном биконе специальную команду смены канала. В ней содержится номер канала, на который устройство хочет переключиться, и указывается, через сколько суперкадров оно намерено это сделать. Получившее такую команду устройство подтверждает готовность смены канала, вставляя аналогичную команду смены канала в свой бикон.

БОРЬБА С ЭКРАНИРОВАНИЕМ

В диапазоне 60 ГГц огромное влияние оказывает появление любого объекта или субъекта на линии передачи. Человек, перекрывший собой линию "передатчик-приемник", может прервать телекоммуникационный обмен, ослабляя сигнал на 20–25 дБ. А в жилых помещениях или офисах, для которых, собственно, и предназначены сети EСМА-387, такие ситуации более чем вероятны. Избежать их невозможно, следовательно, необходимы алгоритмы преодоления.

Во-первых, можно применить механизм "переключаемого разноса передачи" TSD (transmit switched diversity). Он сводится к известному механизму многоканальных антенных систем MIMO, когда анализируются условия передачи между отдельными элементами антенной системы приемника и передатчика (т.е. антенный массив рассматривается как множество независимых антенн) и выбирается оптимальный. В EСМА-387 возможен выбор передающей антенны из массива (рис.10), причем выбор и переключение происходят как в реактивном, так и в проактивном режимах. В первом случае приемник, видя падение отношения сигнал/шум ниже некоего порога, посылает передатчику команду о необходимости смены антенны, передатчик безоговорочно переключает антенну на другую свободную.

В проактивном режиме передатчик накапливает сведения об условиях передачи в различных антенных каналах (для различных передающих антенн) и переключается на канал с наименьшими

затуханиями или помехами. Для этого передатчик должен периодически сканировать все доступные ему частотные и антенные каналы. В отличие от максимального простого реактивного метода проактивный механизм в сочетании с оптимальным выбором режима модуляции и кодирования позволяет достичь наибольших скоростей передачи. Однако и сложность рабочих алгоритмов при этом возрастает.

Другой механизм борьбы с затенением/блокировкой передатчика – ретрансляция. В качестве ретранслятора выступает устройство типа А, реализующее функцию "усиление и передача". Ретранслятор может работать в двух режимах – с декодированием принимаемых/ретранслируемых кадров и с ретрансляцией "бит в бит" без декодирования. Очевидно, что при работе в Discovery Channel ретранслятор должен декодировать и распознавать все сообщения. Стандарт предусматривает возможность приема и передачи как через один и тот же ретранслятор, так и разными маршрутами, задействуя различные ретрансляционные узлы. Для ретрансляции устройство-ретранслятор должно выделить определенные ресурсы в своем суперкадре, что происходит на основе механизма резервирования. Возможно периодическое сканирование каналов в сети для поиска наименее загруженных путей, с наилучшими условиями в каналах передачи. Это также позволяет достичь максимальной скорости передачи данных.

МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Поскольку в сети EСМА-387 используются портативные уст-

ройства, вопрос минимизации их энергопотребления весьма актуален. Для этого стандарт предусматривает два основных механизма – контроль мощности передаваемого сигнала и управления энергопотреблением.

Управление мощностью сигнала происходит на основе обмена командами между передающим и принимающим устройствами. Устройство-приемник может рекомендовать устройству-передатчику изменить уровень мощности излучаемого сигнала, отправляя специальный управляющий кадр (команду). Устройство-передатчик может и по собственной инициативе запросить устройство-приемник об уровне принимаемого сигнала. Метод определения уровня сигнала стандартом не оговаривается, указывается лишь, что он может быть самым разным – на основе отношения сигнал/шум, по амплитуде входного сигнала, по интенсивности ошибок в кадрах (FER) и т.п.

Механизм управления энергопотреблением предусматривает две моды – активную и пассивную. В активной моде устройства принимают и передают биконы в каждом суперкадре. В течение каждого суперкадра они могут находиться в двух состояниях – бодрствующем (обычном рабочем) и спящем. В спящем состоянии устройство не передает и не принимает никакие кадры. При этом его трансивер отключен, за исключением системы управления, периодически включаемой на короткое время. Устройство не информирует свое сетевое окружение о переходе в спящий режим. По сути, устройства в активном режиме могут просыпаться для приема/передачи биконов и во время предназначенных для них слотов доступа.

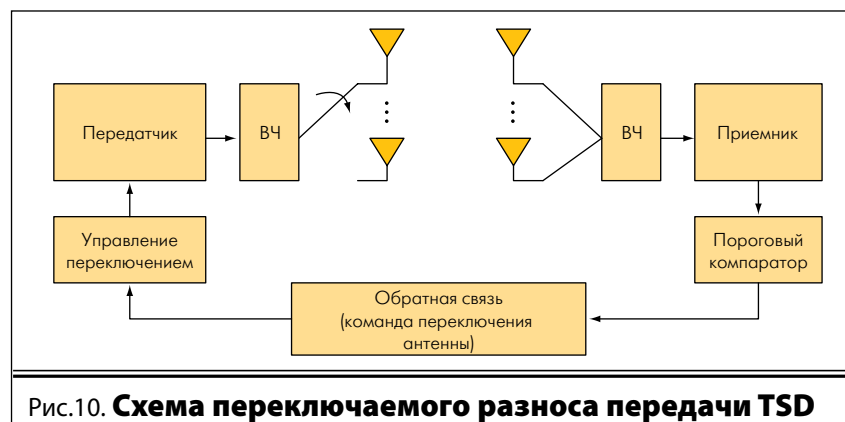


Рис.10. Схема переключаемого разноса передачи TSD

В пассивной моде устройства полностью пассивны, они не принимают и не передают вообще никакие кадры, включая биконны. Устройства заранее извещают сеть о намерении перейти в пассивную моду и вернуться в активную, указывая число суперкадров, через которое состоится переход.

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Стандарт ECMA-387 предусматривает развитую систему аутентификации устройств и защиты передаваемых данных. При организации защищенного соединения для аутентификации устройств может использоваться квитирование (handshake) посредством обмена четырьмя сообщениями на основе парных временных ключей (РТК). При групповой передаче используются групповые временные ключи (ГТК).

Для предотвращения атак повторением кадров предусмотрены специальные счетчики кадров и счетчики повторных пакетов. Повторный прием одного и того же кадра/сообщения в защищенном

режиме невозможен. Очевидно, что устройства, участвующие в защищенном соединении, должны разделять один общий мастер-ключ, на основе которого генерируются временные ключи. РТК не могут транслироваться в сети, даже в защищенном режиме.

Поля данных кадров могут быть защищены на основе алгоритма симметричного шифрования AES-128 (128-битовые блоки данных шифруются с помощью 128-разрядного цифрового ключа).

* * *

В целом, новый стандарт описывает достаточно универсальную сеть с учетом особенностей класса персональных сетей передачи данных в диапазоне 60 ГГц. Очевидно намерение создать универсальный сетевой стандарт, а не просто механизм передачи видеосигналов по схеме "точка-многоточка". Стандарт ECMA-387 находится в развитии, в 2011 году ожидается его вторая редакция.

Но что примечательно – до сих пор нет ни одного промышленного образца устройств, соответствующих данному стандарту. Что

явно противоречит целям ассоциации ECMA, куда входят практически все ведущие мировые производители компьютерной техники и связанных с ней массовых систем передачи данных. Поэтому ожидать готовых устройств и чипсетов ECMA-387 остается совсем чуть-чуть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневский В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3с и спецификация WirelessHD. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №3, с.70–79.
2. Standard ECMA-387 1st Edition. High Rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL. – Ecma International, December 2008
3. Ecma/TC48/2010/025. ECMA-387 2nd Edition: High Rate 60GHz PHY, MAC and HDMI PAL. Whitepaper. – Ecma International, June 2010.
4. Standard ECMA-368 3rd Edition. High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard. – Ecma International, December 2008.