

СТАНДАРТ IEEE 802.11n – УЖ СКОРО

ПРИМИРЕНИЕ НЕПРИМИРИМЫХ

И.Шахнович

— Что мы знаем о лисе?

— НИЧЕГО!

(И то — не все!..)

Б.Заходер

Наверное, писать о стандарте, которого еще нет, — чересчур оптимистичное занятие. Однако появления MIMO-версии стандартов WiFi ждут уже давно, а некоторые, наиболее нетерпеливые, и дожидаться не стали, уже приступив к выпуску соответствующей аппаратуры и элементной базы для беспроводных локальных сетей. С другой стороны, вопросы реальности создания эффективных MIMO-систем актуальны и сегодня. Подход к этой проблеме ведущих мировых производителей телекоммуникационного оборудования и элементной базы в полной мере проявился в процессе создания проекта стандарта 802.11n “High throughput extension to the IEEE 802.11” (Дополнение к стандарту IEEE 802.11 для обеспечения высокой пропускной способности). Взглянем на этот проект и мы.

ЖАРКАЯ ЗИМА НА ГАВАЙЯХ

В середине января 2006 года в Вайколоа (Waikoloa), что на Гавайях прошла очередная регулярная конференция Рабочих групп 11 и 15 комитета 802 IEEE. Занимаются эти рабочие группы стандартами соответственно локальных и персональных сетей беспроводной связи. На конференции параллельно работали многочисленные Целевые группы (Task Group), причем в максимальной степени приковывали к себе внимание события в двух из них — 802.15.3a [1] и IEEE 802.11n. Объединяла эти группы цель — создать стандарты для работы на скоростях свыше 100 Мбит/с. Кроме того, в каждой группе процессы выработки единого решения к 2005 году зашли в тупик. В области 802.15.3a противостояние можно охарактеризовать как “Motorola против всех” (UWB Forum против MBOA), в то время как в группе IEEE 802.11n компании разбились фактически на два примерно равных лагеря — WWISE (World-Wide Spectrum Efficiency) и TGn Sync (и еще небольшая группа MITMOT). В каждой из групп долгое время ни один из альтернативных вариантов не мог набрать необходимые для его утверждения 75% голосов (заметим, открытого голосования).

Результаты противостояния оказались различными. После почти трех лет безуспешных попыток объединиться и принять устраивающую всех спецификацию участники группы 802.15.3a практически единодушно проголосовали за ликвидацию проекта IEEE 802.15.3a. Разумеется, работы в этом направлении не прекращаются ни на минуту и через полгода-год наверняка образуется целевая группа в составе тех же участников.

Члены проекта IEEE 802.11n оказались более гибкими. Разумеется, дело тут не в их личных качествах, тем более что представляют они практически те же самые корпорации, что и

в случае 802.15.3a. Видимо, проще оказалось согласовать вопросы авторских прав на используемые технологии. Работы по созданию будущего стандарта IEEE 802.11n официально начались 11 сентября 2002 года, через год образовалась целевая группа TGn. Весной 2005 года ситуация с выбором окончательного варианта зашла в тупик. Однако уже к осени того же года противоборствующим кланам удалось договориться и создать объединенное предложение, которое ушло интересы всех. В результате на гавайской встрече были утверждены документы [2, 3], которые войдут в предварительный (draft) стандарт IEEE 802.11n. Если все пойдет по плану, в окончательном виде он должен быть опубликован не позднее 2007 года. Так что ждать осталось не долго.

Конечно, стандарт IEEE 802.11n пока не существует даже в черновом варианте, однако мы можем рассматривать согласованные документы Целевой группы N (TGn) как его достаточно адекватный прообраз, тем более что углубляться в технические детали пока бессмысленно.

Проект IEEE 802.11n строится на технологии MIMO-OFDM [4]. Это означает, что применена модуляция посредством ортогональных несущих (как в стандарте IEEE 802.11a и g). Но при этом реализован и принцип MIMO (Multiple input, multiple output), подразумевающий, что приемник и передатчик используют одновременно несколько антенных каналов для взаимной связи (точка-точка). Поэтому очень кратко напомним основные положения IEEE 802.11a.

СТАНДАРТ IEEE 802.11a КАК ОСНОВА IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11a ориентирован на работу в диапазоне 5 ГГц (в области 2,4 ГГц его аналог — IEEE 802.11g) и основан на технологии OFDM. В соответствии с этой технологией информация одновременно передается по многим поднесущим частотам, образующим канал. В сетях IEEE 802.11a в 20-МГц каналах используются 52 поднесущих, однако их номинальное число (выбирается из соображений удобства преобразования Фурье) принимается равным 64. Таким образом, интервал между поднесущими $\Delta f = 20 \text{ МГц} / 64 = 312,5 \text{ кГц}$, а сами поднесущие можно представить как $f_k(t) = a_k \sin [2 (f_0 + k\Delta f)t + \phi_k]$, где $k = -26 \dots 26$. Центральная поднесущая f_0 не используется (ее амплитуда всегда равна 0). Поднесущие модулируются посредством квадратурной амплитудно-фазовой модуляции: 2-, 4-, 16- и 64-позиционной BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM, соответственно. Сигнал удобно представлять в комплексной форме: $C = a \cdot \cos x + j \cdot b \cdot \sin x = A \cdot e^{jx}$, где $j = \sqrt{-1}$. Соответственно, суммарный сигнал на всех поднесущих можно записать как

$$s(t) = \sum_{k=-26}^{26} C_k e^{j2\pi (f_0 + k\Delta f)t} \quad (1)$$

Здесь C_k — комплексная амплитуда k-ой поднесущей, мнимая и действительная составляющие которой соответствуют квадратур-

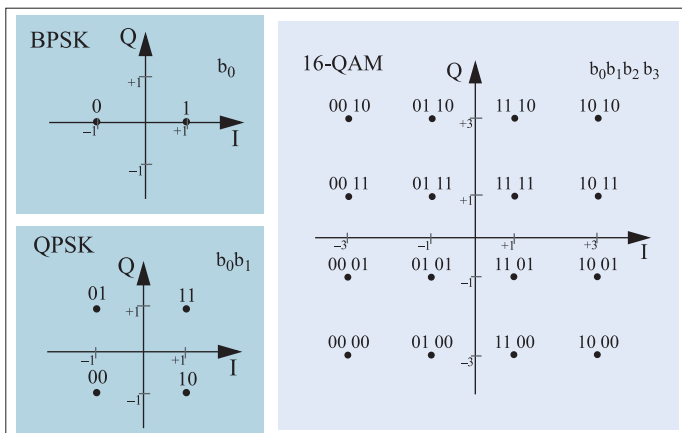


Рис. 1. Представление модуляционных символов для BPSK, QPSK и 16-QAM

ному (Q) и синфазному (I) каналам квадратурной модуляции. Значения этих составляющих выбираются в соответствии с диаграммами Грея (рис.1), исходя из потока информационных битов. Заданным значениям этих битов соответствует OFDM-символ, представляющий собой совокупность всех поднесущих на дискретном интервале длительностью $T_F = 1/\Delta f = 3,2$ мкс.

Информационная емкость OFDM-символа определяется типом модуляции и числом информационных поднесущих. Из 52 поднесущих в стандарте IEEE 802.11a для передачи данных используются 48, остальные четыре поднесущие – пилотные. Следовательно, емкость OFDM-символа составляет $48 \times N_b$, где N_b равен двоичному логарифму от числа позиций модуляции. Таким образом, OFDM-символ содержит от 96 до 288 бит. Отметим, что если используется промежуточная частота и перенос в рабочую частотную полосу происходит аппаратно (например, посредством гетеродина), можно принять $f_0 = 0$ и исключить ее из (1).

OFDM-модуляция обладает мощным средством борьбы с межсимвольной интерференцией, проявляющейся в том, что из-за множественных переотражений в приемник одновременно поступают два смежных символа – прямо распространяющийся и "запоздавший". Это ведет к потере символов. В случае OFDM-модуляции, которая допускает небольшую скорость передачи данных на одной поднесущей, в каждый OFDM-символ добавляется защитный интервал GI. В стандарте IEEE 802.11a его длительность равна $T_F / 4 = 0,8$ мкс. Следовательно, длительность всего символа $T_S = T_{GI} + T_F = 4$ мкс. Защитный интервал транслируется в начале OFDM-символа и представляет собой копию его последних 0,8 мкс.

Сформированный OFDM-символ в виде совокупности значений S_k подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье (ОБПФ), в результате чего (после цифро-аналогового преобразования) формируются выходные синфазный и квадратурный сигналы. Далее следует типичная обработка – квадратурный модулятор, гетеродин для переноса сигнала в заданную область (если это необходимо), и выходной антенный усилитель (рис.2).

Входной поток данных перед модуляцией подвергается скремблированию (в данном случае – рандомизации) посредством перемножения на псевдослучайную последовательность (ПСП) с циклом повторения 127. Ее формирует генератор с задающим полиномом $S(x) = x^7 + x^4 + 1$ и начальным значением 1111111. При передаче каждого пакета вектор инициализации генератора ПСП может быть произвольным, но должен принадлежать ПСП.

Приемник восстанавливает вектор инициализации, поскольку известно, что последние 7 бит поля данных (младшие биты поля SERVICE заголовка, рис.3) перед скремблированием всегда равны нулю.

После скремблирования поток данных поступает на сверточный кодер. Исходя из выбранной скорости передачи данных, скорость кодирования может составлять 1/2, 2/3 и 3/4. Напомним, скорость кодирования – это отношение числа битов в пакете до и после кодера (скорость кодирования $r = 1/2$ означает, что каждый входной бит после кодирования превращается в два бита). Поскольку у кодера два выхода, каждому входному биту x_i соответствует пара выходных битов (y_i, z_i). Значения скорости кодирования, отличные от 1/2, получаются путем исключения из выходной последовательности отдельных значений y_i или z_i (процедура выкалывания).

Далее поток кодированных битов подвергается перемежению (интерливингу) – изменяется порядок битов в последовательности в рамках OFDM-символа. Вся последовательность кодированных битов разбивается на блоки, длина которых равна числу битов в OFDM-символе (N_{CBPS}) при выбранной скорости передачи. В пределах блока биты нумеруются от 0 до ($N_{CBPS} - 1$). Затем происходит двухстадийная перестановка. Цель первого этапа – добиться, чтобы смежные биты кодовой последовательности оказались на несмежных поднесущих. Первый этап перемежения эквивалентен тому, что данные последовательно записываются по строкам в таблицу из 16 строк и $N_{CBPS}/16$ рядов, а затем последовательно считываются по рядам (т.е. считывают в порядке записи, но из транспонированной таблицы).

После второго этапа смежные биты оказываются попеременно в старших и младших разрядах групп, определяющих модуляционный символ квадратурной модуляции. Это делается для того, чтобы два соседних бита не оказались в младших разрядах, надежность передачи которых наиболее низка. Математически процедура перемежения выражается двумя уравнениями, в которых k – номер бита в кодированной последовательности, i – его номер после первого этапа перестановки, j – после второго (окончательный):

$$i = (N_{CBPS} / 16) \cdot (k \bmod 16) + \text{floor}(k / 16);$$

$$j = s \cdot \text{floor}(i / s) + (i + N_{CBPS} - \text{floor}(16 \cdot i / N_{CBPS})) \bmod s;$$

$$s = \max(N_{BPS} / 2, 1), \text{ где } N_{BPS} - \text{число битов на поднесущую.}$$

Функция $x \bmod n$ – значение x по модулю n , значение функции $\text{floor}(x)$ равно наибольшему целому числу, не превышающему x .

После интерливинга последовательность битов разбивается на группы по числу позиций выбранной квадратурной модуляции (1; 2; 4 или 6), и в соответствии с диаграммами Грея определяются значения синфазной (младшие биты) и квадратурной (старшие биты) составляющих комплексных амплитуд. Полученные из диаграмм Грея значения амплитуд умножаются на нормировочный коэффициент 1, $1/\sqrt{2}$, $1/\sqrt{10}$, $1/\sqrt{42}$ для QPSK, 16-QAM и 64-QAM, соответственно. В результате получаются значения комплексных амплитуд

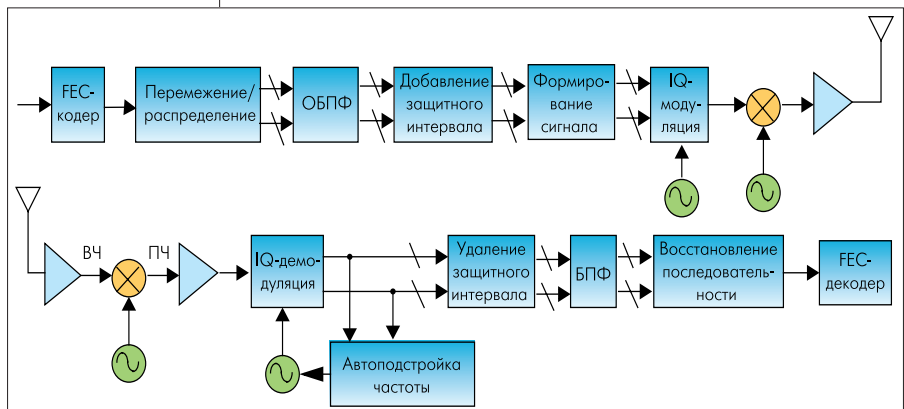


Рис.2. Схема формирования сигналов в стандарте IEEE 802.11a

Таблица 1. Параметры OFDM-символов для различных скоростей передачи данных в стандарте IEEE 802.11a

Скорость передачи данных, Мбит/с	Модуляция	Скорость кодирования	Кодированных битов на несущую (N_{BPSK})	Кодированных битов в OFDM-символе (N_{CBPS})	Информационных битов в OFDM-символе (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

S_k , используемых в формуле (1). Совокупность различных видов модуляции поднесущих и скоростей кодирования и определяет диапазон скоростей передачи данных (табл. 1).

Обмен информацией происходит посредством кадров (пакетов). Пакеты начинают формироваться на MAC-уровне: сначала следует MAC-заголовок, содержащий адреса приемников и передатчиков, а также служебную информацию, далее – собственно данные (поле данных), за ними – контрольная сумма (CRC). Сформированный пакет MAC-уровня (MPDU) встраивается в пакет физического уровня. На физическом уровне кадр представляет собой последовательность в составе преамбулы, заголовка (PLCP-заголовок) и данных, за которыми следуют так называемые хвостовые биты (Tail, равны 0 и обозначают конец поля) и заполняющие биты (Pad), предназначенные для выравнивания длины пакета (рис.3).

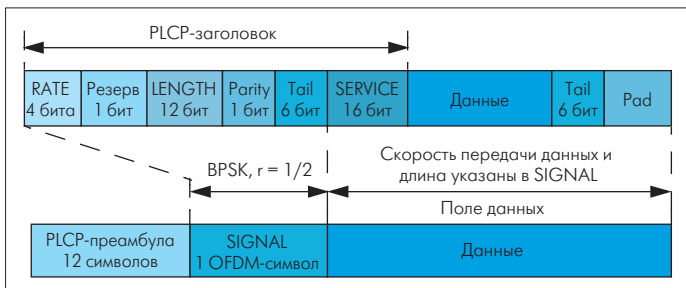


Рис.3. Структура пакетов физического уровня стандарта IEEE 802.11a

Преамбула содержит 12 OFDM-символов. Все поля заголовка, кроме SIGNAL, передаются посредством одного OFDM-символа, причем с наименьшей из возможных скоростей (номинальное значение 6 Мбит/с). Оставшаяся часть заголовка и поле данных транслируются с любой заданной скоростью из списка возможных (см. табл. 1).

Собственно преамбула (рис.4) включает 10 коротких настроечных последовательностей и две длинные последовательности. OFDM-символы коротких последовательностей формируются на основе лишь 12 поднесущих, при этом применяется четырехпозиционная QPSK-модуляция. Длительность короткой настроечной последовательности – 0,8 мкс, защитных интервалов между ними нет. Короткие настроечные последовательности предназначены для автоматической

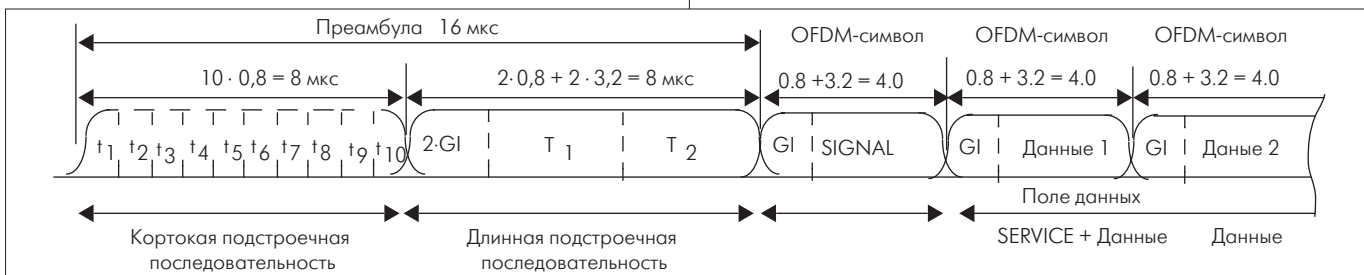


Рис.4. Последовательность передаваемых данных в стандарте IEEE 802.11a

настройки усилителей сигнала (APU), а также временной и частотной синхронизации.

Две длинные настроечные последовательности следуют за короткими с промежутком в два защитных интервала $GI = 0,8$ мкс. Каждой из них соответствуют OFDM-символы, включающие 53 поднесущие (используется и центральная f_0). Поднесущие модулируются посредством двухпозиционной BPSK, длительность символов – 3,2 мкс, защитных интервалов нет. Длинные последовательности предназначены для оценки канала и точной частотной подстройки приемников. Таким образом, длительность трансляции преамбулы составляет 16 мкс.

За преамбулой следует PLCP-заголовок физического пакета. Он состоит из двух фрагментов – SIGNAL и SERVICE. Фрагмент SIGNAL всегда занимает один OFDM-символ и транслируется посредством BPSK-модуляции со скоростью кодирования 1/2 – т.е. максимально надежно. Он не скремблируется. В SIGNAL передается информация о скорости передачи поля данных (поле RATE) и длине пакета (LENGTH). Для надежности используется бит контроля четности (Parity). Шесть последних бит (Tail), всегда равных 0, обозначают конец фрагмента SIGNAL.

Фрагмент SERVICE (16 бит) формально принадлежит заголовку, но входит в поле данных и передается с выбранной для передачи данных скоростью. Используются только младшие 7 бит поля SERVICE (для инициализации генератора ПСП в приемнике), перед скремблированием они всегда равны 0. Остальные 9 бит в стандарте IEEE 802.11a не задействованы.

Поле данных завершают 6 разделительных нулевых бит (Tail). Они добавляются после скремблирования и служат как дополнительное средство контроля ошибок, поскольку в приемнике после сверточного декодера они также должны оказаться равными 0. Кроме того, в конце пакета добавляются специальные биты заполнения PAD (равны 0), так чтобы общая длина поля данных (включая SERVICE) оказалась кратной числу битов в OFDM-символе при выбранной скорости передачи данных.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11n предназначен для дальнейшего расширения диапазона скоростей передачи данных – до 100 Мбит/с и более. В целом же он основывается на рассмотренном выше стандарте IEEE 802.11a, поскольку именно в нем описана технология OFDM. Увеличение скорости передачи данных в проекте IEEE 802.11n основано на двух физических принципах: удвоении полосы пропускания канала (с 20 до 40 МГц) и введении дополнительных антенных каналов приема-передачи (технология многоканальных антенных систем MIMO).

Первым стандартом IEEE, описывающим технику MIMO, был стандарт широкополосных систем связи регионального масштаба IEEE 802.16 [5, 6]. Он допускает опциональное использование техники MISO, т.е. применение двух антенн в передатчике и одной в приемнике. Однако в IEEE 802.11n эта техника проработана гораздо глубже – там возможны от одного до четырех антенных каналов как в передатчике, так и в приемнике. Причем в IEEE 802.11n, в отличие от 802.16, технология MIMO главным образом предназначена



для увеличения полосы пропускания канала связи, а не только для повышения надежности передачи.

ОТЛИЧИЯ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Каналы и режимы передачи

Проект IEEE 802.11n допускает как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц (как и во всех предшествующих стандартах IEEE 802.11, включая IEEE 802.11a), так и расширенные до 40 МГц. Поскольку 40-МГц каналы противоречат национальной политике распределения частотных ресурсов ряда стран, то их применение – это опциональная (необязательная) возможность. Собственно, введение обязательной поддержки 40-МГц каналов и было одним из камней преткновения в противостоянии групп WWiSE и TGn Sync. Однако компромисс нашелся.

Проект 802.11n предусматривает поддержку как традиционных режимов передачи (как в IEEE 802.11a), так и режимов с высокой пропускной способностью (HT – High Throughput). В традиционных (L) режимах число поднесущих не изменено. В HT-режимах оно увеличено: в 20-МГц канале их 56, из них 52 – информационные и 4 пилотные. Только из-за этого скорость возрастает на 8%. Еще один фактор увеличения скорости – повышение допустимой скорости кодирования до 5/6 (т.е. каждые 5 бит исходной последовательности превращаются в 6 бит закодированной). Опционально предусмотрена возможность двукратного сокращения длительности защитных интервалов GI в OFDM-символах – с 0,8 до 0,4 мкс. В результате скорость возрастает до 65 и 72,2 (опционально) Мбит/с. Режим 20 МГц – обязательный, для него установлен базовый набор скоростей (табл.2.). В 40-МГц каналах поднесущих 114, из них 108 информационных и 6 пилотных. Один лишь этот фактор увеличивает пропускную способность канала на 125%.

Отметим, что традиционный режим также позволяет увеличивать (удваивать) скорость передачи данных, используя 40-МГц каналы. Фактически передача ведется на двух смежных каналах IEEE 802.11a, используются $52 \times 2 = 104$ поднесущие (из 128 номинальных поднесущих не задействованы частоты с -5 по 5). При этом в верхней половине 40-МГц канала фаза модуляции смещена на 90° .

Формирование MIMO-OFDM-сигналов

Ключевое отличие стандарта IEEE 802.11n от его предшественников – появление нескольких антенных каналов в приемнике и передатчике. Обязательный режим подразумевает поддержку двух антен-

Таблица 2. Базовый набор скоростей в проекте IEEE 802.11n

Модуляция	Скорость кодирования	Число битов на поднесущую	Кодированных битов на символ	Информационных битов на символ	Скорость передачи данных	
					GI = 0,8 мкс	GI = 0,4 мкс
BPSK	1/2	1	52	26	6,5	7,2
QPSK	1/2	2	104	52	13,0	14,4
QPSK	3/4	2	104	78	19,5	21,7
16-QAM	1/2	4	208	104	26,0	28,9
16-QAM	3/4	4	208	156	39,0	43,3
64-QAM	2/3	6	312	208	52,0	57,8
64-QAM	3/4	6	312	234	58,5	65,0
64-QAM	5/6	6	312	260	65,0	72,2

ных каналов оборудованием точек доступа (AP) и одного канала – пользовательскими (терминальными) станциями. Всего же и у AP, и у терминальной станции может быть до четырех антенных каналов приема-передачи.

Поскольку проектом IEEE 802.11n предусмотрена технология MIMO, изменяется структурная схема передающего и приемного устройств (рис.5.). Данные после скремблирования поступают на сверточный кодер (как и в IEEE 802.11a). Если скорость передачи данных превышает 300 Мбит/с, используются два сверточных кодера. В отличие от IEEE 802.11a, поддерживается скорость кодирования 5/6. Кроме того, опционально вместо двоичного сверточного кодера (BCC) предусмотрено применение блочного кодера LDPC (Low density parity check codes).

Дальше различия более серьезные. Кодированный поток битов разбивается на так называемые пространственные (пространственно-разделенные) потоки (spatial streams). Число таких потоков N_{SS} не может быть меньше, чем число антенных каналов в передатчике N_{Tx} . Предусмотренный алгоритм распределения по потокам прост – входная последовательность разбивается на группы длиной

$$S = \sum_{i_{SS}=0}^{N_{SS}-1} s(i_{SS}), \text{ где } s(i_{SS}) = \max(1, N_{BPSK}(i_{SS}) / 2) - \text{число бит,}$$

определяющих действительную или мнимую составляющую комплексного модуляционного символа на одной поднесущей, $N_{BPSK}(i_{SS})$ – число бит на поднесущую в одном OFDM-символе. Если в каждом пространственном потоке используется одинаковая схема мультиплексирования, то $S = N_{SS} \cdot \max(1, N_{BPSK} / 2)$.

Группы длиной S последовательно (по кругу) распределяются между N_{SS} пространственных потоков. Далее в каждом потоке происходит перемежение битов, аналогично IEEE 802.11a (на первой

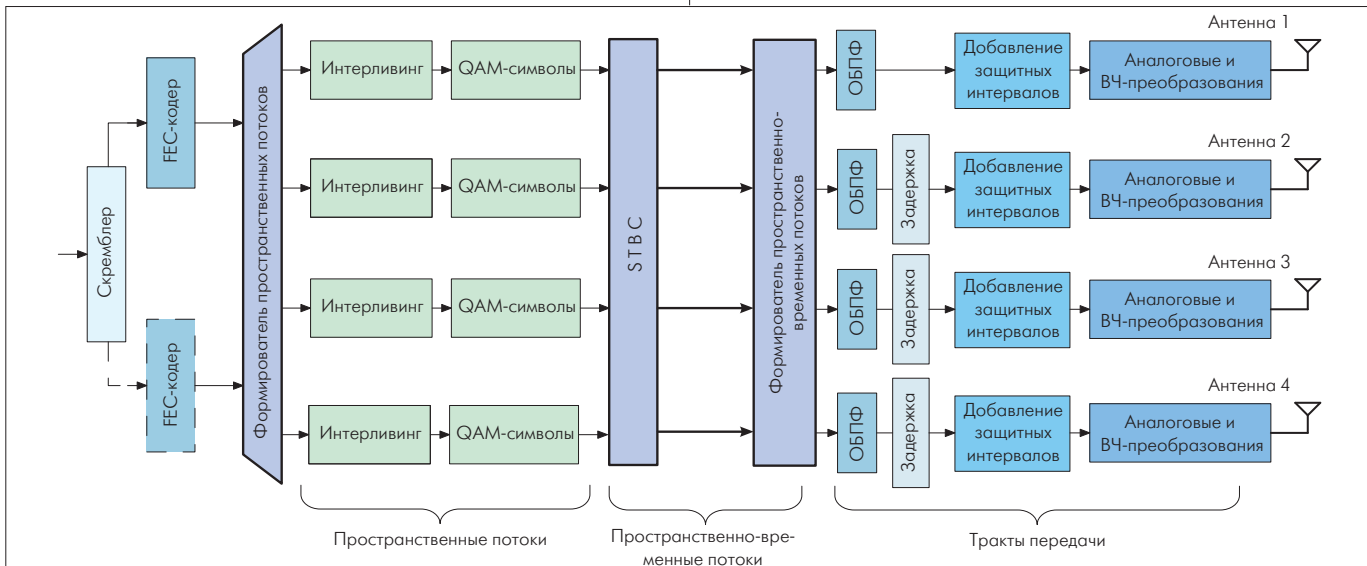


Рис.5. Структура аппаратуры передачи стандарта IEEE 802.11n

стадии для перестановок применяется таблица в 13 строк на $4N_{\text{BPSC}}$ столбцов для 20-МГц канала и $18 \times 4N_{\text{BPSC}}$ — для 40-МГц канала). Если использовано более одного пространственного потока, появляется третья стадия перемежения — частотная ротация. Она описывается выражением

$r = \{j - [2i_{\text{SS}} \bmod 3 + 3 \cdot \text{floor}(i_{\text{SS}} / 3)] \cdot N_{\text{rot}} \cdot N_{\text{BPSC}}\} \cdot N_{\text{CBPS}}$, где j — индекс бита после второй стадии перестановок, i_{SS} — номер пространственного канала. Коэффициент N_{rot} принимает значения 11 и 29 для 20- и 40-МГц каналов, соответственно.

Применение технологии MIMO преследует две цели — повышение надежности приема/передачи и обеспечение связи по пространственно-разделенным каналам (SDM — Spatial Division Multiplexing). В первом случае используется так называемый пространственно-временной блочный код (STBC — Space Time Block Code), повышение скорости передачи происходит за счет сокращения проверочных последовательностей и уменьшения защитных интервалов. При SDM скорость увеличивается благодаря распараллеливанию потоков транслируемых данных.

Пространственно-временное кодирование [4] подразумевает преобразование одного потока OFDM-символов d_i в два пространственно-временных потока (табл.3, символ * означает комплексное сопряжение: если $x = a + jb$, то $x^* = a - jb$). Поэтому в системах IEEE 802.11n число пространственно-временных потоков N_{STS} должно превышать N_{SS} . Возможны различные сочетания значений N_{STS} и N_{SS} , лишь бы $N_{\text{STS}} > N_{\text{SS}}$.

Таблица 3. Пространственно-временное кодирование

	Интервал 1	Интервал 2
Канал 1	d_{2n}	d_{2n+1}
Канал 2	$-d_{2n+1}^*$	d_{2n}^*

После стадии формирования пространственно-временных потоков (если STBC не используется, можно считать, что пространственно-временной поток однозначно соответствует пространственному потоку, $N_{\text{STS}} = N_{\text{SS}}$), происходит их распределение по антенным каналам. Проект IEEE 802.11n предусматривает несколько схем такого распределения. Наиболее простая — прямое назначение (direct mapping) пространственного потока антенному каналу с одинаковыми номерами, при этом число антенных каналов передатчика $N_{\text{TX}} = N_{\text{STS}}$.

Если $N_{\text{TX}} > N_{\text{STS}}$, используются различные схемы пространственного расширения, которые математически описывает выражение

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = [Q] \cdot x = [Q] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix},$$

где r — вектор символов, передаваемых в антенных каналах (длиной N_{TX}), x — вектор символов в пространственно-временных каналах длиной N_{STS} , Q — матрица с N_{TX} строками и N_{STS} столбцами. В схеме прямого назначения Q — диагональная единичная матрица.

В случае двух пространственно-временных потоков и трех антенных трактов первый поток может передаваться через первый и третий антенные тракты, т.е.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{ при } N_{\text{TX}} = 3 \text{ и } N_{\text{STS}} = 1 \quad Q = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что столбцы в матрицах Q должны быть ортогональными (например, на основе матриц Адамара).

Предусмотрен и режим, когда матрица Q принимает различные значения для каждой поднесущей k : в рассмотренном случае при $N_{\text{TX}} = 3$ и $N_{\text{STS}} = 2$

$$Q_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В антенных каналах 2, 3 и 4 информация передается с временной задержкой (относительно канала 1) в 400, 200 и 600 нс, соответственно. Такой фазовый сдвиг необходим, чтобы избежать произвольного формирования стабильной диаграммы направленности передающей антенной системы — а это может произойти, например, при синфазном или противофазном излучении.

Однако предусмотрен так называемый режим формирования луча (beamforming). В этом режиме матрица Q формируется передатчиком на основе информации о состоянии канала связи между ним и выбранным приемником. Вектор принятого приемником совокупно по всем антенным каналам сигнала можно записать как $y = [y_1, \dots, y_{\text{RX}}]^T$. Вектор передаваемого сигнала $r = [r_1, \dots, r_{\text{TX}}]^T$. Тогда $y = H \times r + n$, где n — вектор шума в канале, H — матрица (размерности $N_{\text{RX}}, N_{\text{TX}}$) состояния канала. Поскольку $r = Q \times x$, то $y = H \times Q \times x + n$.

Следовательно, для компенсации задержек и затуханий в канале, описываемых матрицей H , необходимо вычислить и применить соответствующую матрицу Q . Для этого приемник вычисляет и транслирует передатчику либо матрицу состояния канала H , либо уже подготовленные матрицы Q . В качестве тестовой последовательности (заранее известной передатчику) выступают преамбулы пакетов физического уровня (точнее — длинные подстроечные последовательности режима HT, HT-LTF) либо специальные тестовые пакеты "прослушивания" канала, включая пакеты прослушивания без поля данных.

Структура кадров физического уровня

Проект IEEE 802.11n на физическом уровне предусматривает три структуры кадров — традиционную (совпадающую с IEEE 802.11a/g), смешанную и так называемое Зеленое поле (Green Field) (рис.6). Эти структуры соответствуют одноименным режимам работы. Последние два из них называют скоростными (HT).

Смешанный режим (MM — mixed mode) предназначен для совместимости сетей IEEE 802.11a/g и IEEE 802.11n. Традиционные устройства распознают присутствие своих высокоскоростных собратьев и определяют режим их передачи (например, длительность захвата ка-

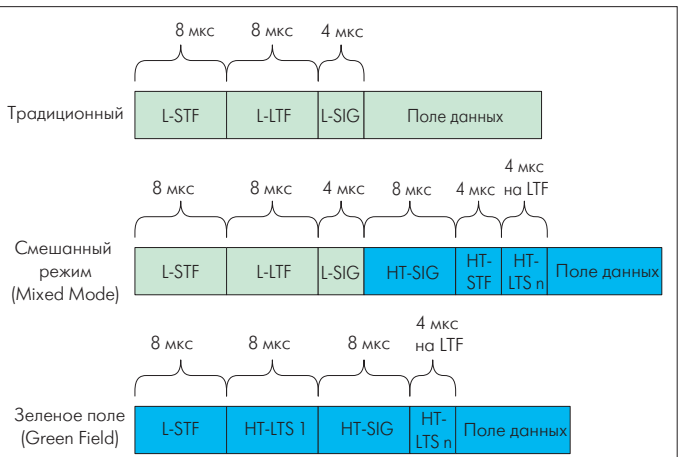


Рис.6. Пакеты физического уровня стандарта IEEE 802.11n

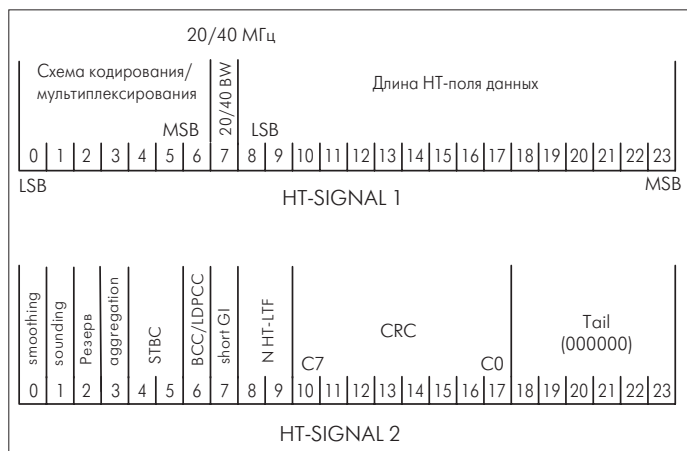


Рис.7. Поле SIGNAL заголовка пакета физического уровня стандарта IEEE 802.11n

нала), что позволяет предотвратить коллизии, особенно в случае скрытых станций. Для этого в структуре пакетов типа MM присутствуют как традиционные поля – короткая и длинная подстроечные последовательности (L-STF и L-LTF) и заголовок SIGNAL (L-SIG), так и поля, необходимые для HT-режима. К последним относятся управляющее поле HT-SIGNAL (HT-SIG), а также короткая и длинные подстроечные последовательности (HT-STF и HT-LTF). Временная задержка между каналами добавляется именно перед HT-полями.

Режим Зеленого поля (GF) позволяет передавать данные наиболее эффективно. В GF-кадрах присутствуют только HT-поля, и традиционные приемники IEEE 802.11 такие посылки не воспримут. Поэтому данный режим опционален.

Управляющее поле HT-SIGNAL состоит из двух частей по 24 бит каждая. Эти части кодируются (со скоростью 1/2), подвергаются перемежению и прочей обработке, как и в случае IEEE 802.11a. Поднесущие модулируются посредством BPSK, только модуляционные символы смещены на 90° относительно традиционного случая (приведенного на рис.1) – т.е. на диаграмме Грея значения битов 0 и 1 соответствуют -1 и 1 на квадратурной (мнимой) оси. В результате поле HT-SIGNAL занимает 2 OFDM-символа.

Информация, передаваемая в HT-SIGNAL: номер схемы кодирования/модуляции (MCS), признак ширины канала (20/40 Мбит), длина поля данных, признаки оценки канала smoothing (интегральная или на каждой поднесущей отдельно), пакетов прослушивания канала (sounding), объединения MAC-пакетов (aggregation), номер схемы STBC-кодирования, указатель типа кодирования (BCC/LDPC), признак короткого защитного интервала в OFDM-символах (short GI), число дополнительных длинных подстроечных последовательностей (NHT-LTF), контрольная сумма CRC и разграничительные 6 бит (Tail) (рис.7).

Короткая подстроечная последовательность аналогична традиционной (с поправкой на число поднесущих). Длинные подстроечные последовательности служат для оценки каналов передачи (для каждого антенного тракта), поэтому их число не может быть меньше, чем число пространственно-временных потоков N_{STS} . Кроме того, HT-LTF – это механизм прослушивания канала, поэтому в кадре может быть больше HT-LTF, чем необходимо для передачи поля данных именно этого кадра (т.е. больше, чем в данный момент используется пространственно-временных каналов). Эти дополнительные последовательности предназначены для оценки каналов, которые передатчик предполагает использовать. Физически вышесказанное означает, что если данные в кадре передаются, например, через антенные тракты 1 и 2, то в них используют длинные подстроечные последовательности HT-LTF1 и HT-LTF2, а одновременно в незадействованных антенных трактах 3 и 4 могут транслироваться последовательно-

сти HT-LTF3 и HT-LTF4 для оценки соответствующих каналов. Длительность HT-LTF – 4 мкс, в режиме GF первая HT-LTF вдвое длиннее.

В результате применения дополнительных антенных трактов, а также 20- и 40-МГц каналов число возможных скоростей передачи и соответствующих им схем модуляции/кодирования существенно возрастает по отношению к базовому набору (см. табл.2). Причем возможны как симметричные схемы модуляции (одинаковые в каждом пространственном потоке), так и несимметричные (вид модуляции в каждом потоке различен). Проект описывает по 32 симметричные схемы для 20- и 40-МГц каналов (для HT-режимов) и по 44 асимметричные схемы. В результате для 20-МГц каналов предусмотрены скорости до 288,9 Мбит/с и до 600 Мбит/с – для 40-МГц каналов.

ОСОБЕННОСТИ MAC-УРОВНЯ

Повышение скорости передачи возможно не только за счет изменений на физическом уровне. MAC-уровень в проекте IEEE 802.11n также модернизирован. Одна из важнейших особенностей IEEE 802.11n – возможность объединения (агрегирования) нескольких MAC-пакетов (MPDU) в один пакет физического уровня PSDU (A-MPDU) (рис.8). У такого объединенного пакета может быть только один адрес получателя. При этом повышается скорость передачи данных, поскольку сокращается удельный объем служебной информации (заголовки и преамбулы пакетов физического уровня). Объединение пакетов – это обязательное требование, и только те MPDU, которые требуют индивидуального подтверждения приема (Ack), могут передаваться как отдельные пакеты. Более того, один MPDU может агрегировать несколько пакетов MSDU (MAC service data unit), принадлежащих различным сервисным потокам (различными приложениями) и обладающих различными требованиями к качеству предоставления услуг (QoS), лишь бы у них был единый адрес приемника. В результате формируется объединенный MAC-пакет A-MSDU (см. рис.8).

Для подтверждения приема пакетов физического уровня PSDU используется специальный пакет блочного подтверждения (Block Acknowledge – BA), описанный в недавно принятом стандарте IEEE 802.11e, посвященном вопросам QoS. Однако в IEEE 802.11n используется "сжатые" BA – в этом пакете предусмотренное стандартом 802.11e поле подтверждения размером 128 байт сокращено

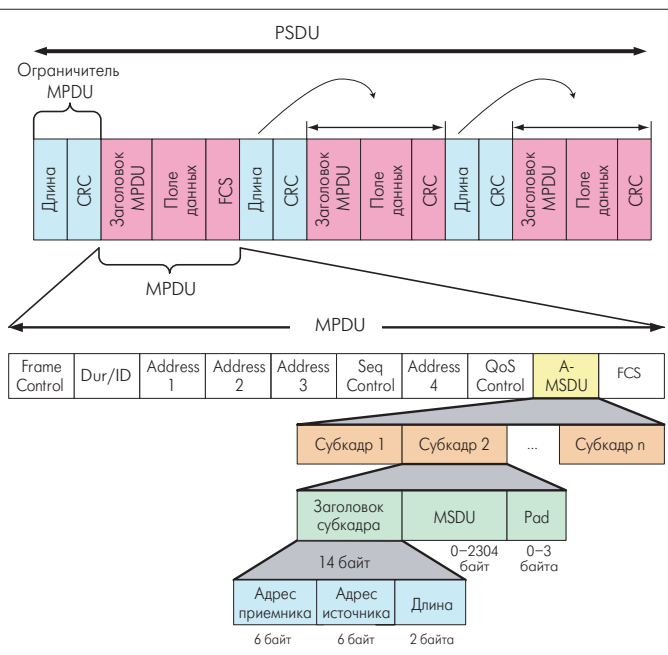


Рис.8. Интегрированные заголовки MAC-уровня стандарта IEEE 802.11n

до 8 байт, причем каждый бит в этом поле подтверждает прием отдельного MSDU (рис.9). Более того, запрос подтверждения (отдельный пакет BAR – BA request) может не использоваться, вместо этого достаточно задать определенный тип политики подтверждений. По утверждениям разработчиков, приведенный на рис.9 механизм обмена (объединенный пакет и блок подтверждения) более чем в 2,5 раза эффективнее, чем традиционный "данные- подтверждение".

Важная особенность проекта IEEE 802.11n – режим PSMP (Power Save Multi-Poll) – энергосберегающий множественный опрос. Он похож на стандартный режим централизованного распределения ресурсов PCF – управляющая станция AP транслирует специальный управляющий пакет PSMP, в котором для каждой станции (из тех, которым разрешен режим PSMP) назначается время и длительность приема и передачи (нисходящего и восходящего соединений) в интервале обслуживания (цикле повторения приема-передачи). Причем длительность интервала обслуживания для каждой станции может быть различной. Для подтверждения приема в режиме PSMP используются специальные пакеты подтверждения (MTBA), следующие немедленно за переданными агрегированными пакетами данных. Электроэнергия экономится благодаря тому, что станции знают, когда им необходимо активизироваться, и могут выключать свои энергоемкие блоки на время бездействия.

Особенность данного режима – его гибкость. В рамках одного цикла PSMP управляющая станция может передавать дополнительные PSMP (sub-PSMP) – это режим мультифазного PSMP. В чем его удобство? Например, какая-либо станция не успела передать данные в отведенный для нее интервал (рис.10). Тогда в конце этого интервала она посылает AP специальный пакет с указанием необходимых этой станции дополнительных ресурсов (запрос RR). Если есть возможность, AP отправляет в ответ пакет sub-PSMP, в котором данной станции выделен дополнительный интервал передачи. Другой случай – потеря данных. Если передающая станция не получила подтверждения приема, AP также может предоставить ей дополнительные ресурсы для повторной пердачи посредством sub-PSMP.

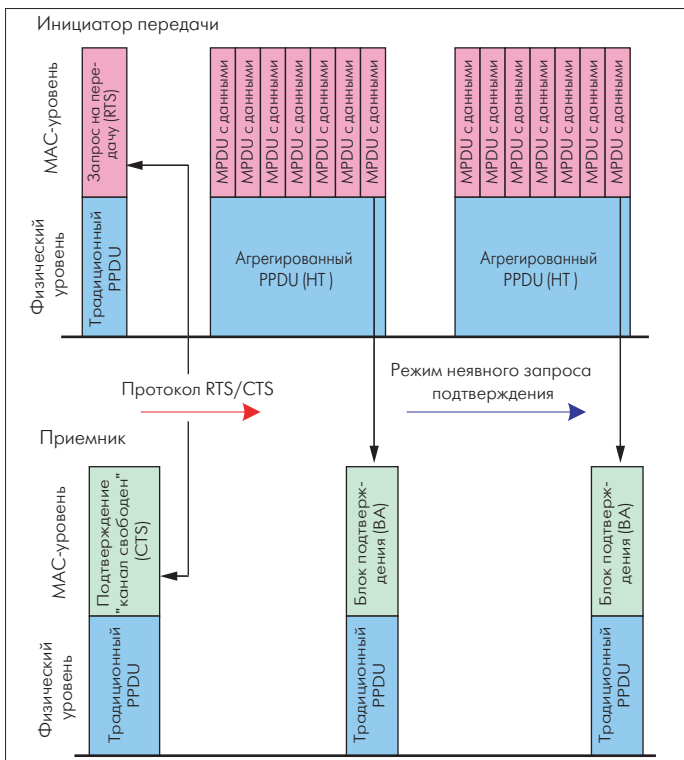


Рис.9. Передача посредством агрегированных пакетов и блоков подтверждения

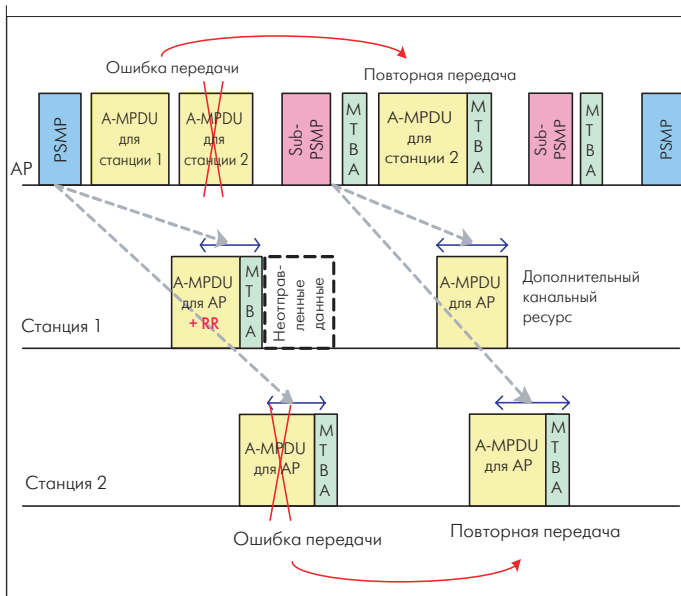


Рис.10. Выделение окна передачи для досылки информации и повторной отправки данных в режиме мультифазного PSMP

Не менее интересная особенность IEEE 802.11n – режим изменения направления обмена соединения. Пусть станция А передает данные станции Б. Оставаясь в рамках того же соединения, т.е. без дополнительных процедур доступа к каналу, возможно изменить направление передачи – от станции Б к станции А, а затем вновь передать права трансляции станции А.

Разумеется, помимо перечисленных особенностей, MAC-протокол проекта IEEE 802.11n включает поддержку всех изменений физического уровня. Он определяет специальные форматы пакетов калибровки канала передачи, выбора антенн, измерения характеристик канала и передачи матриц параметров канала, формирования диаграмм направленности и т.п. Предусмотрено применение сокращенных до 2 мкс межкадровых интервалов (RIFS) и т.д.

Таким образом, можно утверждать, что проект IEEE 802.11n очень скоро превратится в стандарт. А он остро необходим, поскольку производители элементной базы и аппаратуры уже выпускают WiFi-продукты с отдельными возможностями IEEE 802.11n. Разумеется, еще должна появиться черновая (draft) версия стандарта, она будет обсуждаться и корректироваться, но в целом надежды разработчиков на окончательное утверждение стандарта к апрелю 2007 года не выглядят чересчур оптимистичными. Подождем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шахнович И.** Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15.3 и 802.15.4. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №6, с.32–36.
2. Joint Proposal: High throughput extension to the IEEE 802.11 Standard: PHY. – IEEE 802.11-05/1102r4.
3. Joint Proposal: High throughput extension to the IEEE 802.11 Standard: MAC. – IEEE 802.11-05/1095r5.
4. **Слюсар В.** Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №8, с. 52–58.
5. **Шахнович И.** Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1, с.32–36.
6. **Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005.