

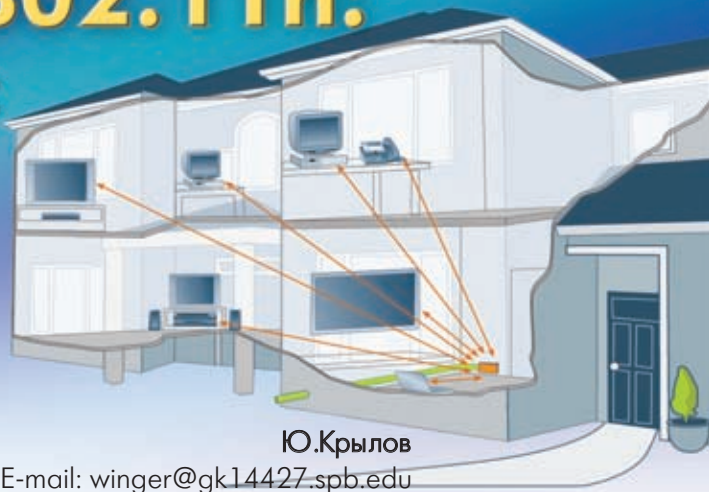
# СТАНДАРТ IEEE 802.11n:

## РЕШЕНИЕ ОТ КОМПАНИИ METALINK

Около года назад мы рассматривали основные положения будущего стандарта IEEE 802.11n [1]. С тех пор подготовка его утверждения идет полным ходом. Уже выпущена предварительная (draft) версия 1.04 стандарта [2], и, по всей вероятности, уже в 2007 году он будет официально опубликован. Производители интегральных схем и оборудования также не сидят сложа руки. Они уже приступили к производству СБИС и аппаратуры, в которых реализованы основные принципы спецификации IEEE 802.11n. И одним из лидеров этого направления выступает израильская компания Metalink.

**З**ачем нужны массовые (читай – домашние) локальные сети с пропускной способностью свыше 100 Мбит/с? Ответ очевиден – для трансляции мультимедиа. Сегодня актуальны беспроводные сети с возможностью передачи высокоскоростных видеопотоков, в том числе – в формате телевидения высокой четкости (HDTV). Причем в пределах всей квартиры/дома, а не одной комнаты. Современные мультимедийные приложения уже требуют скоростей передачи порядка 60 Мбит/с (для трансляции трех потоков HDTV), и, что немаловажно, с высокой надежностью и качеством. Существующие WiFi-технологии с этой задачей не справляются. Да, максимальная номинальная скорость стандартов IEEE 802.11a/g – 54 Мбит/с, но реальная пропускная способность таких сетей не превышает 25 Мбит/с, причем на расстояниях не более 10 м прямой видимости. А в квартире или офисе скорость передачи современных беспроводных сетей зачастую не превосходит 10 Мбит/с.

Стандарт IEEE 802.11n призван повысить эффективность локальных сетей передачи информации. Его утверждение ожидается в 2007 году. Но производители элементной базы уже приступили к созданию чипсетов для его реализации. Одна из лидирующих позиций здесь принадлежит израильской компании Metalink ([www.metalinkbb.com](http://www.metalinkbb.com)) – разработчику и произво-



Ю.Крылов

E-mail: winger@gk14427.spb.edu

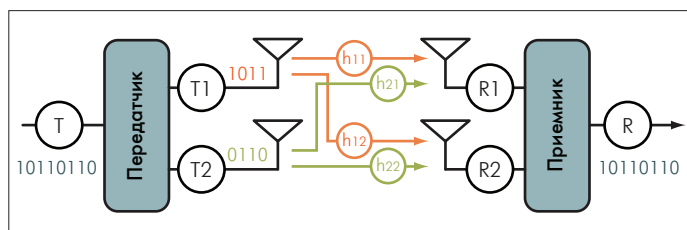
дителю чипсета WLANPlus. Мы рассмотрим этот комплект СБИС, однако прежде кратко остановимся на основных достоинствах технологии IEEE 802.11n и проанализируем, каким образом она обеспечивает большую по сравнению со своими предшественниками производительность.

### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ IEEE 802.11n

Напомним основные положения стандарта IEEE 802.11n (поддержанные в чипсете WLANPlus). Как и все стандарты комитета IEEE 802.11, он предназначен для создания локальных беспроводных сетей, действующих в нелицензируемых (в США и ряде других стран) диапазонах частот. Стандарт описывает алгоритмы работы и требования к аппаратуре на физическом уровне (Phy) и на уровне управления доступом к каналу (MAC) (Media access control – подуровень уровня соединения в терминологии модели взаимодействия открытых систем). Новый стандарт призван повысить пропускную способность локальных беспроводных сетей до номинальных скоростей свыше 100 Мбит/с.

Стандарт IEEE 802.11n предназначен для работы в диапазоне 5 ГГц, обеспечивая совместимость с оборудованием IEEE 802.11a. Однако он отличается от предшественников как на физическом, так и на MAC-уровне. Подробно эти отличия описаны в обзоре [1]. Ключевые нововведения на физическом уровне – применение технологии антенных систем MIMO (multi-input multioutput – "множественный вход множественный выход") и возможность удвоить ширину канала. На MAC-уровне появилась возможность объединить несколько пакетов в один (на MAC-уровне это также далеко не единственное новшество).

Технология MIMO – одно из наиболее перспективных направлений развития беспроводных систем передачи данных [3]. Она предполагает наличие в приемнике и передатчике несколь-



**Рис. 1. Система 2×2 MIMO**

ких антенных каналов. Задействовать эти каналы можно по-разному: они могут функционировать как абсолютно независимые (например, поляризационно- или частотно-разнесенные) и как коррелированные. Цель применения MIMO-техники в стандарте IEEE 802.11n, где все антенные каналы действуют в едином частотном диапазоне, – увеличение скорости передачи, расширение частотного диапазона и повышение спектральной эффективности по сравнению с "традиционными" системами.

Здесь важно напомнить, что в стандарте IEEE 802.11n, равно как и в IEEE 802.11a/g, используется OFDM-модуляция (Orthogonal Frequency Digital Multiplexing – мультиплексирование посредством ортогональных несущих). В стандарте IEEE 802.11n каждый информационный символ (OFDM-символ) объединяет 56 модулированных поднесущих частот, где 4 – пилотные и 52 – информационные. Для сравнения: в стандартах 802a/g поднесущих всего 52, из них 4 – пилотные. Таким образом, MIMO – это фактически дополнительное кодирование информации, так называемое пространственно-временное кодирование STC (space-time coding). Именно такое сочетание кодирования в частотной и пространственной области и обеспечивает множественность путей распространения сигнала. Это делает систему связи более надежной, в частности, благодаря устойчивости к межсимвольной интерференции. Последнее крайне актуально при создании систем передачи информации в помещениях или в условиях городской застройки, где уровень переотражений сигнала велик.

В упрощенном виде технологию MIMO, применяемую в IEEE 802.11n, можно представить как разделение высокоскоростного потока OFDM-символов на N потоков, где N – число передающих антенн. По сравнению с традиционными системами с одной антенной SISO (single input, single output – "один вход один выход"), если в каждом канале сохранять номинальную скорость, общая пропускная способность системы теоретически возрастет в N раз. Если же суммарная пропускная способность MIMO-системы не отличается от SISO-системы, то скорость в каждом антенном канале можно снизить в N раз. Это позволит, например, увеличить дальность передачи – ведь чем медленнее канал, тем ниже предельно допустимое соотношение сигнал/шум (SNR).

Приемник восстанавливает исходный поток данных, полученный по различным антенным каналам. При этом число приемных антенн может отличаться от числа передающих. Рассмотрим пример MIMO-системы с двумя передающими антеннами и двумя приемными (2×2 MIMO) (рис. 1) [4]. Входной

поток символов T разделяется на два субпотока и поступает на передающие антенны T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub>. Поскольку в приемнике также две антенны (R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>), всего формируется четыре возможных эфирных (пространственных) канала: T<sub>1</sub> → R<sub>1</sub>, T<sub>1</sub> → R<sub>2</sub>, T<sub>2</sub> → R<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> → R<sub>2</sub>. Каждый из этих каналов характеризуется своей передаточной функцией h<sub>TR</sub>. Для простоты предположим, что передаточные функции каждого канала постоянны во времени. Тогда сигналы в приемных антеннах можно описать как

$$\begin{aligned} R_1 &= h_{11} \cdot T_1 + h_{21} \cdot T_2; \\ R_2 &= h_{12} \cdot T_1 + h_{22} \cdot T_2, \end{aligned}$$

или в матричном виде  $\mathbf{R} = \mathbf{H} \times \mathbf{T}$ . Следовательно,  $\mathbf{T} = \mathbf{H}^{-1} \times \mathbf{R}$

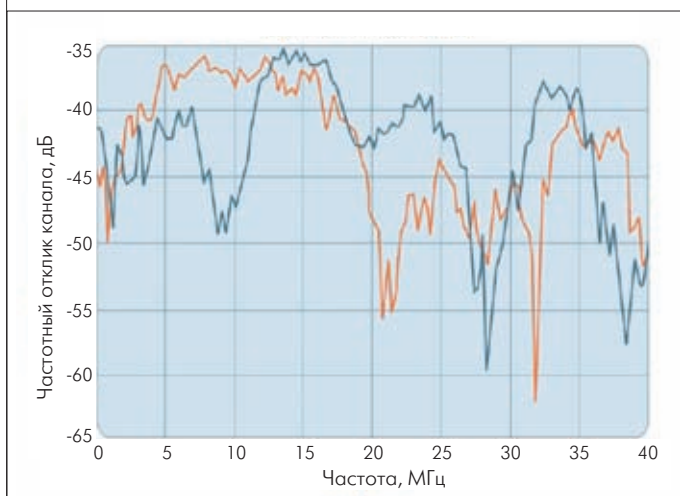
$$\left( \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \right).$$

Именно эта процедура и выполняется в MIMO-приемнике.

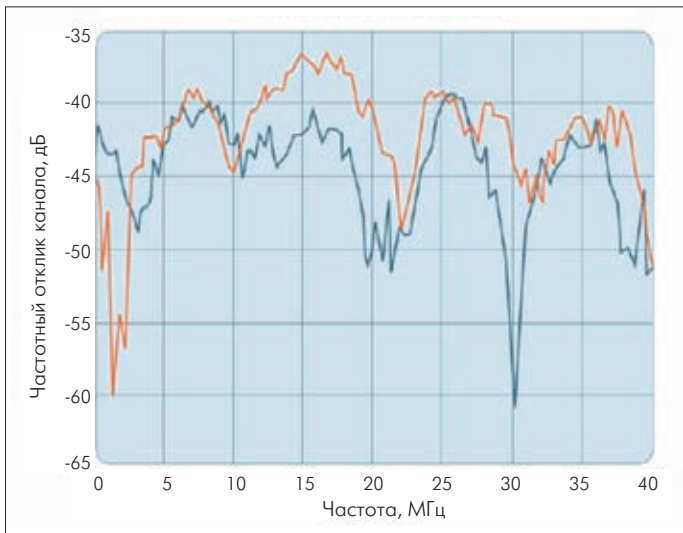
Для реализации данной схемы необходимо знать текущее значение матрицы состояния каналов  $\mathbf{H}$ . Для ее вычисления в стандарте IEEE 802.11n используются специальные пакеты с известными последовательностями  $\mathbf{T}$ . Зная  $\mathbf{T}$  и  $\mathbf{R}$ , несложно рассчитать  $\mathbf{H}$ .

Очевидно, что для эффективной работы MIMO-системы коэффициенты в столбцах матрицы  $\mathbf{H}$  не должны одновременно оказаться равными 0, что эквивалентно коррелированному замиранию сигнала от одной антенны сразу во всех приемных каналах. В этом случае невозможно восстановить в приемнике переданный сигнал. Однако многолучевое распространение сигнала и пространственное разделение потоков, а также специально вводимые фазовые задержки (временное разнесение) в каждом из передающих каналов препятствуют такому эффекту.

Некоррелированность передаточных функций двух каналов в системе с двумя передающими и одной приемной антеннами демонстрирует рис.2. Видно, что между каналами нет интерференции, которая приводит к ошибкам приема. Даже



**Рис.2. Некоррелированное распространение сигнала в системе с двумя передающими и одной приемной антенной**

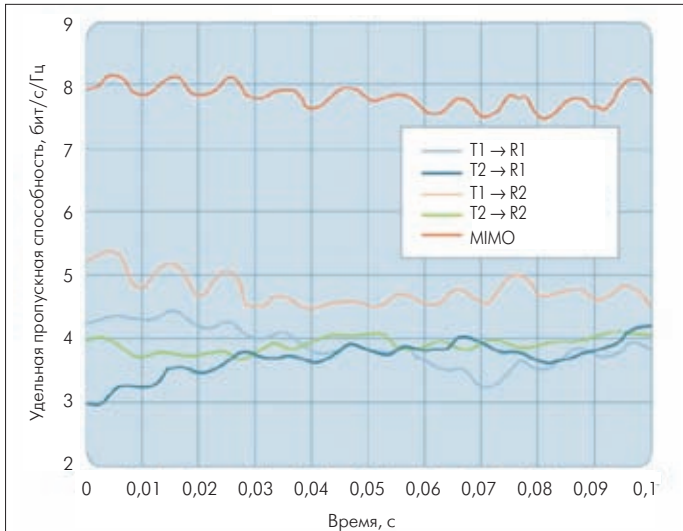


**Рис.3. Некоррелированное распространение сигнала в системе с двумя приемными и одной передающей антенной**

в худшем случае, при коррелированном замирании в одном передающем канале, информация все равно будет восстановлена по сигналам из другого. В системе с одной передающей и двумя принимающими антеннами ситуация аналогична описанной (рис.3).

С ростом числа приемных антенн увеличивается и надежность работы MIMO-системы. Это связано с пропорциональным увеличением числа пространственных каналов. Чем их больше, тем более вариативна принимаемая информация и тем ниже вероятность полного замирания сигнала сразу во всех каналах. Добавление одной приемной антенны увеличивает соотношение сигнал/шум примерно на 3 дБ. Однако увеличение числа антенных каналов в приемнике существенно усложняет обработку сигналов. Соответственно, растет и стоимость устройства.

Рассмотренная модель MIMO-системы существенно упрощена. Достаточно отметить, что из-за случайных аддитивных шумов матрица состояния каналов постоянно меняется, что требует ее постоянного вычисления. Тем не менее, экспери-

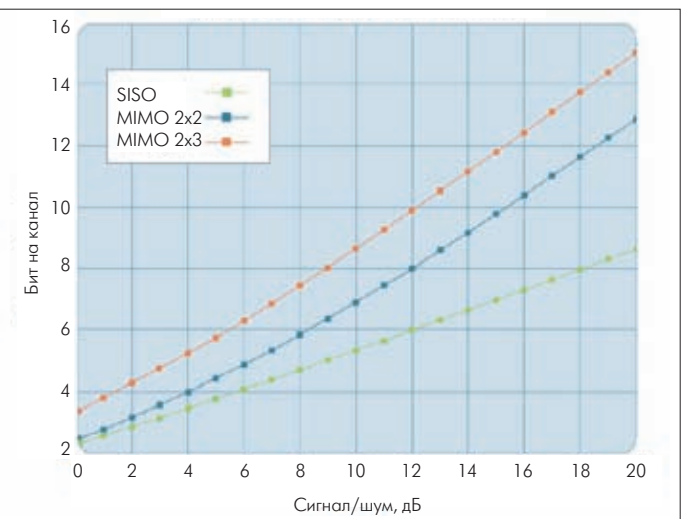


**Рис.4. Удельная пропускная способность отдельных пространственных каналов и MIMO-системы в целом**

менты показывают, что средняя мгновенная пропускная способность 2x2 MIMO-системы действительно вдвое выше скорости передачи данных в каждом из пространственных каналов (рис.4). Более того, несмотря на существенную вариативность пропускной способности в каждом из каналов, скорость передачи для всей MIMO-системы остается достаточно стабильной. Это свойство положительно влияет на столь важный показатель телекоммуникационных систем, как качество услуг (QoS – Quality of Service).

Специалисты компании Metalink провели экспериментальное сравнение 2x2- и 2x3-MIMO-систем (с двумя и тремя приемными антеннами, соответственно). В эксперименте моделировалось поведение системы 2x3. Использовалось 64 независимых набора матриц состояния каналов (2x3) с релейским замиранием. Для каждого из них вычислялась пропускная способность, которая затем усреднялась для всех 64 случаев. Такая модель достаточно точно отражает среднюю пропускную способность для всех поднесущих в OFDM-системе. Эксперимент повторялся 1000 раз. Результаты продемонстрировали, что средняя пропускная способность системы составляет 99% от суммарной пропускной способности всех каналов (рис.5). Аналогичные вычисления одновременно проводились и для подматриц 2x2 из исходных матриц. Моделирование показало различие в пропускной способности этих систем в 3 дБ. В реальных беспроводных локальных сетях эффект усреднения проявляется меньше из-за частотной интерференции, однако усиление пространственного разнеса для 2x3 MIMO-систем оказывается на 4–5 дБ выше, чем для 2x2-систем.

Благодаря повышению усиления обработки 2x3 MIMO-систем по сравнению с системами 2x2 можно увеличить не только пропускную способность, но и зону покрытия. Радиус зоны покрытия определяется затуханием сигнала PL. Этот параметр можно вычислить как  $PL (дБ) = 10n \cdot \lg(R)$ , где R – расстояние (м), n – параметр затухания (n = 2 на открытом простран-



**Рис.5. Спектральная эффективность SISO- и MIMO-систем (результаты моделирования) в условиях релейских замираний. Уровень снижения общей пропускной способности по отношению к суммарной номинальной пропускной способности всех каналов – 1%**



стве и  $n = 3,5$  в помещении). Внутри помещения для рассмотренных выше условий повышение отношения сигнал/шум с 4 до 5 дБ эквивалентно увеличению радиуса зоны покрытия на 33%.

Еще одно важное отличие IEEE 802.11n от предшественников – возможность удвоить ширину частотного канала. Стандарт IEEE 802.11n допускает работу не только в 20-МГц канале (как и стандарт IEEE 802.11a), но в полосе 40 МГц. В соответствии с теоремой Шеннона, максимально достижимая скорость безошибочной передачи данных  $C$  (бит/с) определяется как  $C = W \log_2(1 + S/N)$ , где  $W$  – ширина полосы пропускания (Гц),  $S/N$  – отношение мощности полезного сигнала к мощности шума в этой полосе (отношение сигнал/шум). Из уравнения следует, что максимальная скорость передачи прямо пропорциональна ширине полосы канала. Поскольку стандарт IEEE 802.11n позволяет работать в канале шириной 40 МГц, порог максимальной скорости передачи удваивается. Кроме того, в так называемом режиме высокой пропускной способности (HT-режим, High Throughput) число информационных поднесущих OFDM увеличивается до 108 (против 48 в стандарте IEEE 802.11a). Все это повышает номинальную пропускную способность канала в 2,25 раза.

Удвоение ширины канала позволяет также увеличить зону покрытия. С одной стороны, в этом случае при той же выходной мощности передатчика соотношение сигнал/шум на каждой поднесущей ухудшается на  $10 \lg(108/48) = 3,52$  дБ. Одна-

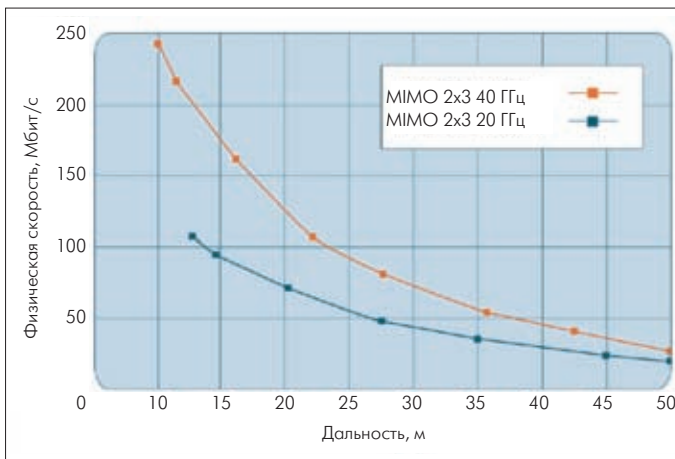
**Таблица 1. Параметры канала передачи данных MIMO-систем**

	IEEE 802.11a	MIMO 2×2, 20 МГц	MIMO 2×2 40 МГц, макс. скорость	MIMO 2×2 40 МГц, макс. дальность
Число информационных поднесущих	48	48	108	108
Число бит в модуляционном символе на одной поднесущей	6	6	6	4
Число кодированных бит в OFDM-символе	288	288	648	432
Скорость потока кодированных бит, Мбит/с	72	72	162	108
Скорость кодирования	3/4	3/4	3/4	1/2
Скорость информационного потока в одном антенном канале, Мбит/с	54	54	121,5	54
Общая скорость информационного потока, Мбит/с	54	108	243	108

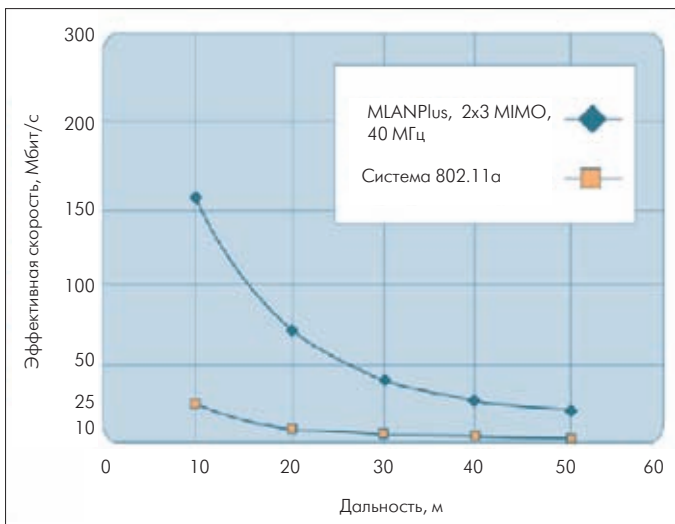
ко увеличение числа поднесущих позволяет снизить скорость передачи по каждой из них. Так, для достижения пропускной способности 108 Мбит/с в 20-МГц канале системы 2×2 MIMO используется 64-позиционная квадратурная амплитудная модуляция (64-QAM) каждой поднесущей со скоростью кодирования 3/4 (три исходных символа преобразуются в четыре кодированных). Но чтобы достичь такой же пропускной способности в 40-МГц канале, в HT-режиме достаточно модуляции 16-QAM и скорости кодирования 1/2 (табл. 1). Из уравнения Шеннона следует, что снижение емкости OFDM-символа

с 6 до 4 бит (смена 64-QAM на 16-QAM) эквивалентно уменьшению порогового значения сигнал/шум на 6 дБ (при переходе от 20-МГц к 40-МГц режиму ширина полосы одной поднесущей не изменяется). За счет меньшей скорости кодирования (1/2 против 3/4) выигрыш в бюджете линии передачи составляет еще 3 дБ. Таким образом, суммарный выигрыш равен  $-3,5 + 6 + 3 = 5,5$  дБ. Это позволяет увеличить радиус зоны охвата на 43% (или увеличение площади этой зоны на 200%). Варьируя число уровней QAM и скорость кодирования, 40-ГГц технология IEEE 802.11n обеспечивает нужные соотношения дальности действия и скорости обмена телекоммуникационной системы в весьма широком диапазоне (рис.6 и 7).

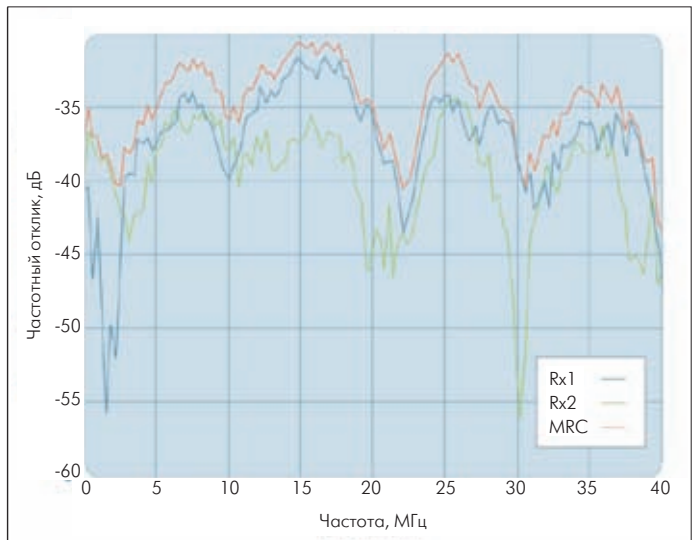
Устройства IEEE 802.11n совместимы с оборудованием стандарта IEEE 802.11a и могут одновременно работать с ними в одном частотном диапазоне. Более того, система передачи данных, включающая как устройства IEEE 802.11a, так и IEEE 802.11n, предоставляет дополнительные возможности в плане повышения дальности передачи. Используя два приемных антенных канала, можно не только существенно снизить вероятность возникновения замираний в канале (условия для



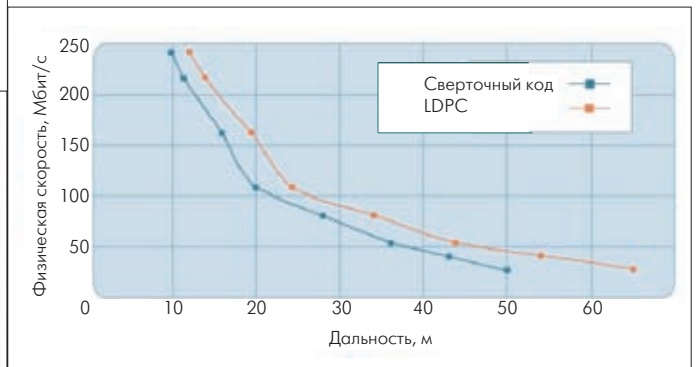
**Рис.6. Дальность/скорость передачи данных системы 2x3 MIMO для 20- и 40-МГц каналов**



**Рис.7. Дальность/скорость передачи данных для системы 2x3 MIMO на основе чипсета WLANPlus с шириной канала 40 МГц по сравнению с традиционными системами стандарта IEEE 802.11a**



**Рис.8. Соотношение частотных характеристик приемных каналов (Rx1 и Rx2) и суммарной характеристики системы (MRC) в случае 1x2 MIMO, что актуально для смешанного применения оборудования стандартов IEEE 802.11n и 802.11a**



**Рис.9. Соотношение эффективности сверточного кода и LDPC**

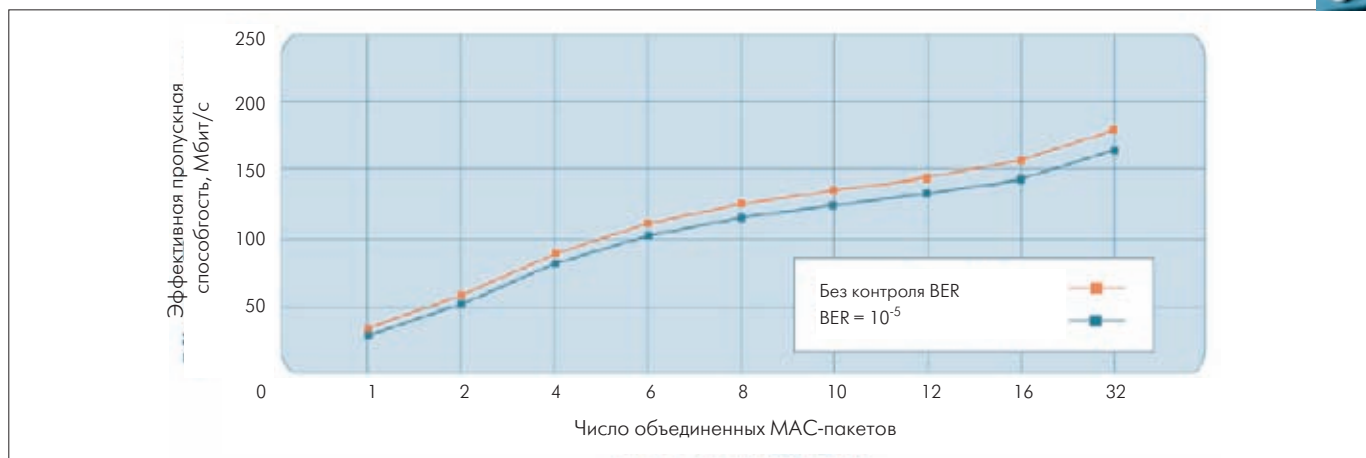
возникновения замираний сигнала сразу в двух пространственных антенных каналах маловероятны), но и улучшить бюджет системы на 3 дБ. Это означает, что дальность передачи увеличится примерно на 20% по сравнению с оборудованием IEEE 802.11a (рис.8).

Еще одна немаловажная особенность нового стандарта – использование в качестве корректирующего кода (FEC) алгоритма LDPC (low-density parity check – разреженный контроль четности). LDPC – это линейный блочный код, который обеспечивает усиление обработки порядка 3 дБ по сравнению с традиционным сверточным кодом (рис.9). Этот алгоритм уже опробован и принят в таких системах, как спутниковое цифровое вещание DVB-S2 и проводной Gigabit Ethernet.

Стандарт IEEE 802.11n предоставляет дополнительные возможности и на MAC-уровне. Одна из важнейших среди них – это возможность объединения нескольких пакетов в один. Обмен по беспроводной сети происходит посредством пакетов.

**Таблица 2. Пропускная способность различных технологий (Мбит/с) в зависимости от дальности передачи**

Расстояние, м	SISO	2x2 MIMO, 20 МГц	2x2 MIMO, 40 МГц
10	54	108	216
20	24	48	96
30	12	24	48



**Рис. 10. Выигрыш от объединения пакетов. Скорость на физическом уровне – 216 Мбит/с, длина пакета – 1000 байт. При объединении 32 пакетов эффективная скорость передачи данных: без контроля ошибок – 178 Мбит/с, с уровнем ошибок BER = 10<sup>-5</sup> – 164 Мбит/с**

Каждый пакет физического уровня, помимо собственно поля данных (пакет MAC-уровня), содержит служебные поля – заголовков, контрольную сумму и т.п. Более того, каждый переданный пакет в ряде режимов требует подтверждения приема, на что также расходуется трафик. Все эти накладные расходы неизбежно снижают эффективную скорость обмена в лучшем случае до 50%. Увеличение объема поля данных ограничено соображениями вероятности безошибочной передачи пакета. Поскольку здесь ресурсы стандарта IEEE 802.11n гораздо выше, чем у предшественников, размер пакета зачастую можно увеличить. Для этого предусмотрена процедура объединения нескольких стандартных пакетов MAC-уровня в один. В результате снижается не только доля служебной информации на единицу полезных данных в самом пакете, но и затраты на передачу пакетов подтверждения приема. Таким образом, эффективность передачи возрастает до 70% (рис. 10).

Специалисты Metalink экспериментально подтвердили эффективность новой технологии для современных мультимедийных задач (табл. 2).

### ЧИПSET WLANPlus

Все описанные достоинства грядущего стандарта уже воплощены в чипсете WLANPlus компании Metalink. В его состав входят две СБИС – сдвоенный трансивер MtW8150 и , а также

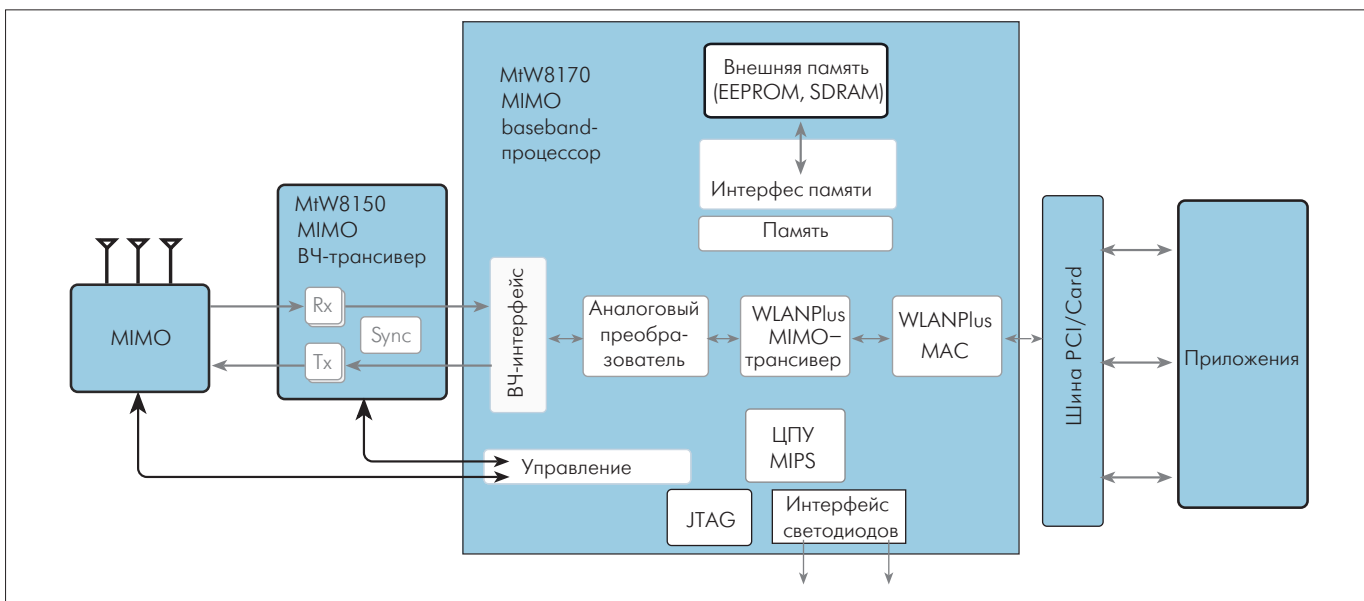
MAC/baseband-процессор (телекоммуникационный процессор) MtW8170 (рис. 11).

В СБИС MtW8150 на одном кристалле интегрированы два цифровых трансивера для частотного диапазона 4,9–5,9 ГГц с полосой пропускания 20/40 МГц (рис. 12). По утверждению компании, это первая СБИС, реализующая технологию 2×2 MIMO. Она также совместима и с требованиями для трансиверов стандарта IEEE 802.11a.

Трансиверы в СБИС MtW8150 построены по принципу прямого преобразования (т.е. с нулевой промежуточной частотой), а потому не нуждаются во внешних ПАВ-фильтрах. Устройство поддерживает квадратурную модуляцию – вплоть до 64-QAM. MtW8150 можно каскадировать для реализации систем более чем с двумя антенными каналами (например, 4×4). В состав СБИС входят генератор, синтезатор частот с ФАПЧ, система автоматической регулировки усиления и схема измерения уровня принимаемого сигнала (Receive Signal Strength Indicator, RSSI).

СБИС изготовлена по Si-Ge-технологии, напряжение питания – 3 В, корпус – TAPP (Thin Array Plastic Package) размером 11×11 мм.

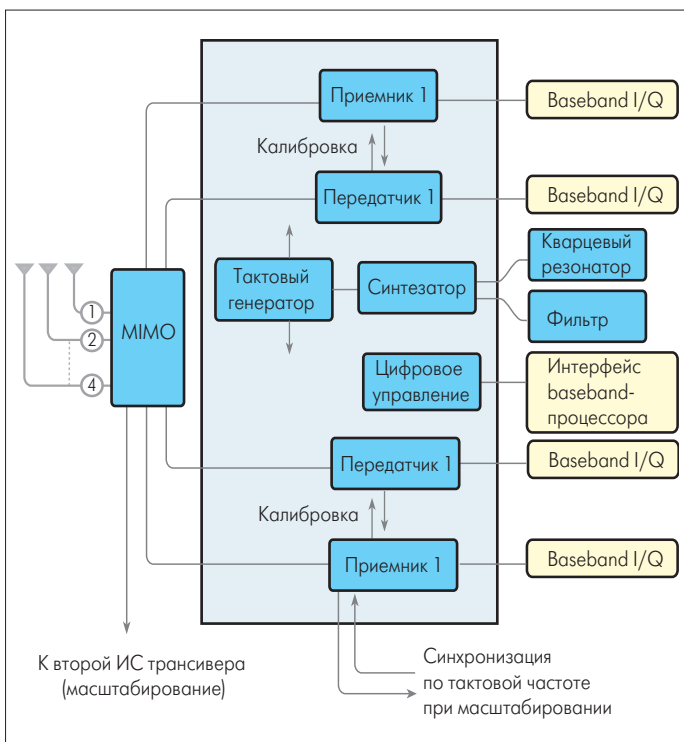
СБИС MAC/baseband-процессора MtW8170 поддерживает физический и MAC-уровни системы связи. Она обеспечивает скорости передачи данных до 243 и 135 Мбит/с в 40- и 20-МГц



**Рис. 11. Построение MIMO-системы на основе чипсета WLANPlus**

каналах, соответственно. Поддерживается обратная совместимость с оборудованием IEEE 802.11a. Одной СБИС MtW8170 достаточно для реализации MIMO-конфигураций 2×2 и 2×3. Аппаратно поддержан алгоритм криптозащиты WPA2 в соответствии со стандартом IEEE 802.11i. Реализованы такие механизмы QoS, как назначенная очередность доступа (Scheduled Access Wireless Multi-Media, WMM-SA) по стандарту IEEE 802.11e. В СБИС поддержан интерфейс PCI.

Стандарт IEEE 802.11n еще не утвержден. Однако к августу 2006 года ведущие производители телекоммуникационного оборудования (Linksys, D-Link, Netgear, Buffalo, Belkin и др.)



**Рис. 12. СБИС MIMO-трансивера MtW8150**

уже продали свыше 300 тыс. устройств (маршрутизаторов, точек доступа, абонентских устройств), поддерживающих draft-версию этого стандарта [5]. Причем подобные устройства в два-три раза дороже, чем их аналоги стандарта IEEE 802.11g. Вслед за компаниями Airgo и Metalink – бесспорными пионерами этого направления – свои чипсеты представили такие известные производители, как Atheros, Broadcom и Marvell. В июле 2006 года о выпуске IEEE 802.11n-трансивера объявила уже тайваньская компания Airgo. Другой производитель с Тайваня – фирма Ralink – намеревается начать производство 802.11n-чипсетов в конце 2006 года. И если в 2006 году продажи чипсетов IEEE 802.11n составили лишь 3,6% от общего объема продаж комплектов СБИС для беспроводных сетей, то по прогнозу известной компании In-Stat (www.instat.com), в 2007 году их доля возрастет до 20%, а в 2008 году может превысить 50% (195 млн. чипсетов).

Все это свидетельствует о том, что сектор высокоскоростных беспроводных локальных сетей передачи информации – на пороге нового технологического скачка. Поэтому он заслуживает самого пристального внимания, в том числе – со стороны отечественных производителей радиоэлектронной аппаратуры. Господа, обратите внимание на это перспективное направление, в том числе – на продукцию компании Metalink, пионера и лидера в данной сфере.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Шахнович И. Стандарт IEEE 802.11n – уж скоро. Примирение непримиримых. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №1.
2. IEEE P802.11n/D1.04. – IEEE, september, 2006.
3. Слюсар В. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №8.
4. WLANPlus. MIMO-based Next-Generation Wireless LAN Technology. – www.metalinlbb.com.
5. www.instat.com.