

МИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН КАК ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

стандарт IEEE 802.15.3c и спецификация WirelessHD

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

Диапазон 60 ГГц, как и вообще миллиметровый диапазон, привлекал к себе внимание разработчиков не одно десятилетие. Но подступиться к нему производителям массовых систем было сложно – отсутствовала соответствующая дешевая и миниатюрная элементная база. В начале третьего тысячелетия проблема стала решаться. Ситуация сразу изменилась кардинально – из сугубо «военных» и «аэрокосмических», 4- и 5-мм диапазоны уверенно осваивают производители потребительской электроники. И, разумеется, их коллеги, работающие в области специальных систем. По нашему мнению, события в диапазоне 60 ГГц, равно как и в E-диапазоне, могут стать новой инновационной волной, сопоставимой с появлением стандартов сотовой связи и систем Wi-Fi. Почему? Попробуем разобраться в этом в серии публикаций.

ДОСТОИНСТВА ДИАПАЗОНА 60 ГГц

Диапазон 60 ГГц (длина волны – 5 мм) достаточно долго привлекал внимание разработчиков телекоммуникационных систем (см. врезку). Тому есть ряд причин. Во-первых, в полосе примерно 57–64 ГГц очень сильно затухание радиоволн на атмосферном кислороде – до 16 дБ/км (рис.1). Еще сильнее затухание при дожде (рис.2). Казалось бы, налицо яркий недостаток, диапазон 60 ГГц – типичное окно непрозрачности. Однако этот недостаток становится достоинством, если задуматься о таких параметрах, как скрытность, возможность повторного использования частот, взаимного влияния

приемопередающих устройств и т.п. Разумеется, для передачи на дальние расстояния, в единицы километров, диапазон 60 ГГц далеко не оптимален (для этой задачи лучше подходит соседний миллиметровый E-диапазон, см. ниже). Но если говорить о расстояниях в сотни и десятки метров (локальные и персональные сети, соответственно), картина радикально меняется.

В самом деле, в соответствии с законом Фрииза, в свободном пространстве мощность принятого сигнала $P_r = P_t G_t G_r \lambda^2 / (4\pi R)^2$, где P_t – мощность передатчика, G_t и G_r – усиление передающей и приемной антенн, λ – длина волны излучения и R – расстояние между приемником

и передатчиком. Соответственно, для длины волны 5 мм и дальности 100 м отношение P_r / P_t , без учета усиления антенн, составит примерно -108 дБ. При этом поглощение на атмосферном кислороде (примерно 1,5 дБ на 100 м) не окажет решающего влияния.

Таким образом, на относительно малых дистанциях в 60-ГГц диапазоне при прямой видимости основной фактор – «естественное» ослабление сигнала. Конечно, оно велико, и это – недостаток. Но его могут с лихвой компенсировать другие достоинства. Прежде всего, из-за сильного ослабления, связанного с поглощением на атмосферном кислороде, устраняется проблема интерференции

между различными источниками сигнала, принадлежащими разным сетям. Это позволяет автоматически решить проблему повторного использования частот – исчезает задача частотного распределения. Именно поэтому диапазон 60 ГГц во многих ведущих странах мира признан безлицензионным (табл.1, рис.3). Одновременно достигаются такие показатели, как скрытность связи (необнаруживаемость), целостность (стойкость к прицельным помехам) и стойкость к несанкционированному подключению (невозможность фальсифицировать мобильную станцию или точку доступа).

Не менее важное достоинство – ширина доступной полосы, до 7 ГГц. Это делает 60-ГГц диапазон если не безальтернативным, то чрезвычайно привлекательным для высокоскоростной сверхширокополосной передачи (напомним, по определению FCC США, сверхширокая полоса – все, что превышает 500 МГц [2]). Это позволяет передавать высокоскоростные потоки информации, включая трансляцию видеопотоков с нескольких видеокамер, передачу видеосигнала высокого разрешения (табл.2), организацию транспортных потоков в сотовых сетях и т.п. Кроме того, широкая полоса допускает применение самых разнообразных схем скремблирования, помехоустойчивого кодирования, выбор оптимальных для передачи данных методов модуляции и множественного доступа, что обеспечивает возможность передачи данных с требуемой скоростью при очень низком соотношении сигнал/шум.

Другой важнейший фактор – длины волн в миллиметровом диапазоне (мм-диапазоне) существенно снижают габариты антенных систем. Для достижения узкой диаграммы направленности (т.е. для большего усиления антенны) требуются меньшие размеры самих антенн. Действительно, усиление антенны можно оценить как $G = 4\pi S/\lambda^2$, где S – апертура антенны (т.е. ее эффективная площадь). Тогда формула Фрииза преобразуется к виду $P_r = P_t S_t S_r / (\lambda R)^2$, т.е. с учетом фактора антенны потери мощности в канале P_r/P_t оказываются обратно пропорциональными квадрату частоты. При эффективной площади в 10 см^2 усиление антенны составит 35 дБ, при $S = 1 \text{ см}^2$ – 17 дБ (если не используются антенны с фазирован-

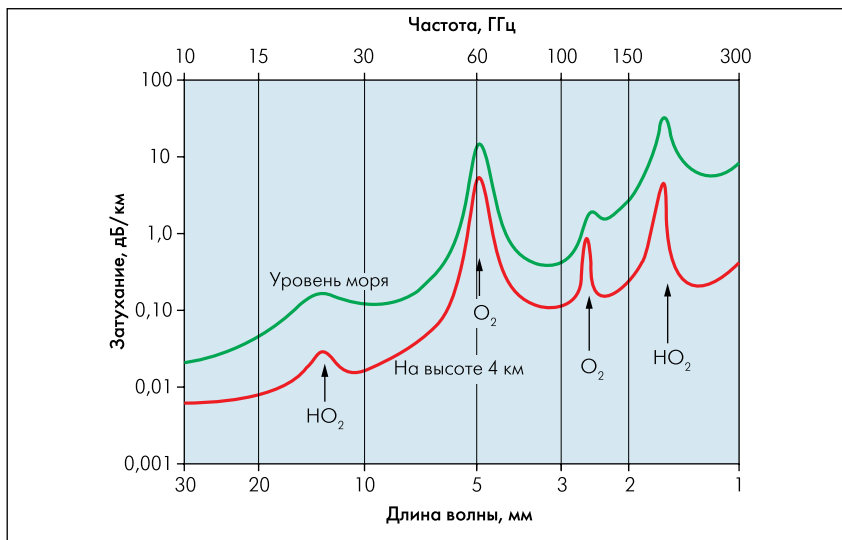


Рис.1. Ослабление сигнала в воздухе за счет атмосферного кислорода и воды (согласно рекомендации ITU-R P.676-5)

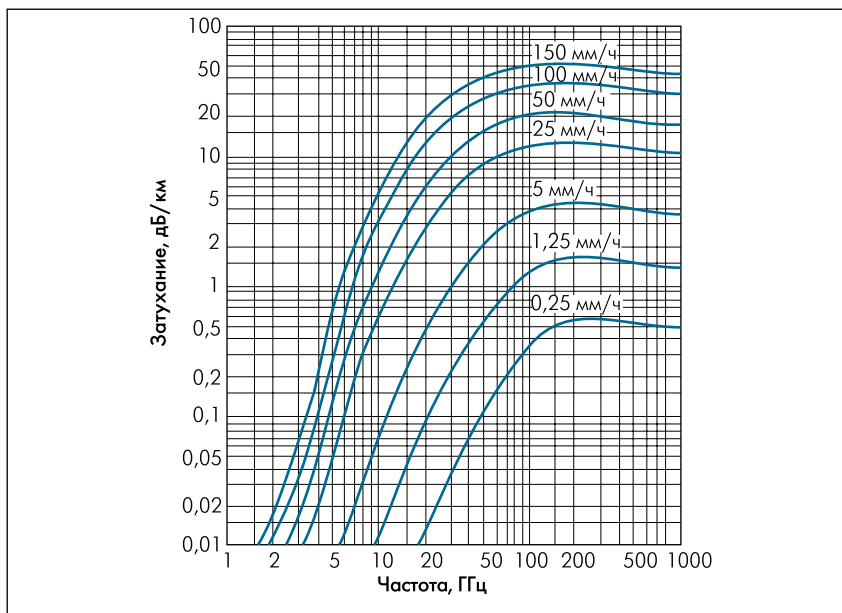


Рис.2. Уровень затухания сигнала при осадках

Таблица 1. Частотное регулирование в 60-ГГц диапазоне в различных странах мира. Данные приведены без учета особенностей отдельных поддиапазонов [1]

	Япония	Северная Америка	Южная Корея (draft)	Евросоюз	Австралия
Диапазон частот, ГГц	59–66	57–64	57–64	59–66	59,4–62,9
Мощность передатчика, дБм	10	–	10	27	10
Эквивалентная изотропная мощность в антенне (EIRP), дБм	57	40 средняя, 43 пиковая	57	40 средняя, 43 пиковая	51,8

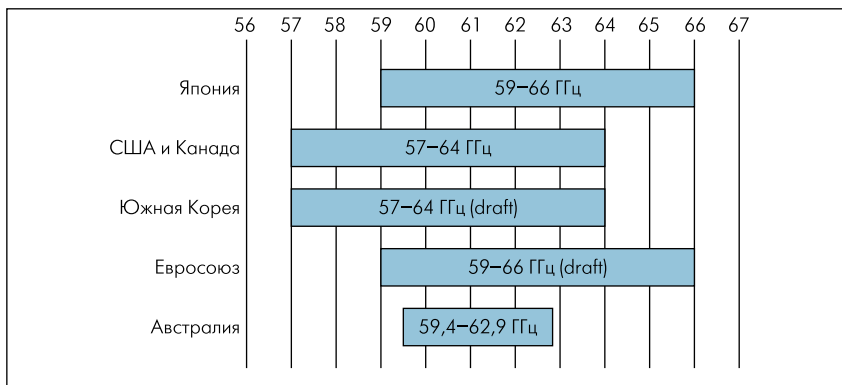


Рис.3. Свободные участки спектра в диапазоне 60 ГГц в различных регионах мира

ными решетками или другими способами формирования узкой ДН).

Следовательно, для связи в диапазоне 60 ГГц можно создавать миниатюрные антенные системы, вплоть до интегрированных в чип фазированных антенных решеток или направленных антенн другой конструкции. Это открывает блестящие перспективы в плане производства монолитных или квазимонолитных интегрированных приемопередающих устройств, позволяющих применять их по принципу «включил – работает». Вся тонкость и сложность конструирования и настройки радиосистем мм-диапазона скрыта от того, кто применяет такие модули как уже готовые компоненты. Причем такие интегрированные антеннотрансиверные модули позволяют создавать системы с многолучевыми перестраиваемыми диаграммами направленности (smart-антенны). При этом возможны два подхода – антенная система с переключением лучей (массив направленных антенн) и антенная система с синтезом диаграммы направленности (адаптивные). Второй метод более эффективен, поскольку позволяет формировать «нули» в диаграмме направленности, исключая ненужную интерференцию от «паразитных» передатчиков, однако более сложен в аппаратной реали-

зации. Адаптивные антенны могут быть как с аналоговым (фазовращатели – системы временной задержки), так и с цифровым управлением. В каждом из этих направлений уже получены практические результаты.

Все это позволяет говорить о скором появлении нового класса элементной базы электроники, соответственно – о принципиально новых потребительских устройствах и системах.

Наконец, отметим, что электромагнитное излучение в диапазоне 60 ГГц относительно безвредно, поскольку не проникает глубже внешних кожных покровов (поглощается водой). Тем не менее, существующие нормы FCC (Rule 1.1310) ограничивают поверхностную плотность мощности излучения на уровне 1 мВт/см² при средней экспозиции свыше 30 мин и 5 мВт/см² – при средней экспозиции свыше 6 мин.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Несмотря на очевидные достоинства, развитию технологий связи в мм-диапазоне препятствовало отсутствие соответствующей элементной базы. Но сегодня эти проблемы в принципе решены, даже на уровне КМОП продемонстрированы образцы однокристалльных 60- и 77-ГГц (диапазон для автомобильных радаров) трансиверов со встроенными антенными

массивами, серийно производятся отдельные элементы трансиверов мм-диапазона – малошумящие усилители (МШУ) для приемников, усилители мощности (УМ) передатчиков, смесители, модуляторы и т.п. Уровень развития технологий цифровых ИС вполне достаточен для создания необходимых высокоскоростных ЦАП/АЦП, высокопроизводительных специализированных телекоммуникационных процессоров (baseband-процессоры), OFDM-процессоров и т.п. Развитие получили технологии широкополосных СВЧ-антенн, включая планарные антенны, чипантенны (и антенные решетки), антенны на основе метаматериалов и т.п. Но это сегодня.

Реальные же работы по освоению диапазона 60 ГГц стартовали в конце 1990-х годов. В США Федеральная комиссия связи (FCC) и ведущие промышленные компании в начале 1996 года создали исследовательскую группу Millimeter Wave Working Group (MMWWG) для выработки единых правил использования диапазона 57–64 ГГц. В нее вошли представители компаний Hewlett-Packard (лидер группы), Apple, Hughes, Metricom, Motorola, Rockwell и Sun Microsystems. Уже в декабре 1996 года группа MMWWG опубликовала свой отчет, в котором были отражены такие требования, как ограничение пиковой мощности излучения, лимиты мощности, требования на идентификацию передатчиков. Также была показана необходимость наличия «канала координации передатчиков» и постулирован принцип «слушать прежде чем передавать» при совместной работе в едином диапазоне. Все эти рекомендации были одобрены FCC в 1998 году, диапазон 59–64 ГГц был объявлен безлицензионным и свободным для разработки новых продуктов и услуг. Несколько позднее диапазон был расширен до 57–64 ГГц, правила работы в нем сформулированы в документе FCC Rules Part 15.255.

Как только технологические перспективы и технологические возможности освоения диапазона 60 ГГц стали очевидными, а произошло это примерно в 2005–2006 годах, начался процесс стандартизации и формирования международных промышленных альянсов. Изначально речь шла о персональных сетях, причем прежде всего – о беспроводном аналоге

Таблица 2. Ориентировочные потребности в полосе пропускания для несжатого видеосигнала высокой четкости различных форматов, Гбит/с

Формат	8-бит RGB	10-бит RGB	12-бит RGB
480p	0,5	0,625	0,75
720p	1,4	1,75	2,1
1080i	1,5	1,9	2,25
1080p	3,0	3,75	4,5

интерфейса HDMI. В марте 2005 года была сформирована целевая группа 3с (TG3с) комитета IEEE 802.15, работающего в области стандартизации персональных сетей (этому предшествовала двухлетняя работа по изучению проблемы). Через год образовался тесно сотрудничающий с этой группой промышленный альянс WirelessHD. В него вошли такие ведущие производители бытовой электроники, как LG Electronics, Matsushita Electric (Panasonic), NEC, Samsung, Sony и Toshiba, а также американская компания SiBeam – fabless-производитель элементной базы. Позднее к ним присоединился ряд других компаний, в том числе Intel, Broadcom и Philips. Спецификация WirelessHD появилась в январе 2008 года, утверждена как промышленный стандарт в сентябре 2009 года. Она основывалась на работах группы TG3с IEEE. Сама спецификация, дополнение IEEE 802.15.3с Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension [3] к стандарту персональных сетей IEEE 802.15.3 [4, 5], была одобрена в сентябре и опубликована 12 октября 2009 года.

Одновременно в Европе в декабре 2008 года был принят стандарт Европейской ассоциации по стандартизации информационных и коммуникационных систем (ЕСМА) – ЕСМА-387 High Rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL. 15 ноября 2009 года он был опубликован как стандарт ISO/IEC 13156 [6]. Стандарт этот также ориентирован на персональные сети. В его создании участ-

1. Применение очень высоких частот позволяет получить остронаправленное излучение, что имеет большое значение не только для радиолокации, но и для радиосвязи, в частности при построении радиорелейных линий.

2. В диапазоне коротких волн делаются неощутимыми атмосферные и многие виды промышленных помех.

3. Чем выше частота, тем меньше дает себя знать "теснота в эфире", т.е. тем большее число станций может работать без взаимных помех.

4. Большой "простор" позволяет применить помехоустойчивые широкополосные системы модуляции.

5. Чем больше скорость передачи, тем больше должна быть частота, на которой она ведется...

Александр Александрович Харкевич, 1962 год [9].

вовали такие фирмы, как Panasonic, Phillips, IBM, Ericsson, Newlans и GEDC (Georgia Electronic Design Center).

В 2009 году организовалась целевая группа, работающая над стандартом IEEE 802.11ad, посвященным уже локальным беспроводным сетям в диапазоне 60 ГГц. Одновременно, 7 мая 2009 года, сложился промышленный альянс Wireless Gigabit Alliance, куда изначально вошли такие компании, как Atheros, Broadcom, Dell, Intel, LG Electronics, Marvell, Microsoft, NEC, Nokia, Panasonic, Samsung Electronics и др. Позднее к ним присоединился ряд других компаний: NXP, Realtek, STMicroelectronics, Tensorcom, Cisco, Texas Instruments и др. Разработка спецификации Wireless Gigabit Alliance была завершена в декабре 2009 года, в мае 2010 она была опубликована и доступна для членов альянса.

Наконец, отметим так называемый E-диапазон – 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц. В отличие от 60-ГГц диа-

пазона, он лежит в «окне прозрачности» (см. рис.1), что делает его приемлемым для высокоскоростной передачи данных на расстояния в единицы километров. Поскольку габариты антенных систем в этом диапазоне могут быть существенно снижены, достигается высокая направленность передачи. История массового освоения E-диапазона началась в 2003–2005 годах, когда Федеральная комиссия связи США определила правила использования этих диапазонов для высокоскоростной фиксированной передачи данных [7]. С тех пор он активно развивается. Ведущие производители телекоммуникационного оборудования – Nokia Siemens Networks, Proxim, E-Band Communications Corporation (EBCC), Siklu и ряд других активно включились в производство систем связи в этом диапазоне. В основном речь идет о связи «точка–точка», и основными потребителями выступают операторы широкополосной беспроводной

Таблица 3. **Стандарты систем передачи данных в 60-ГГц диапазоне**

Стандарт (организация)	Статус	Максимальная скорость передачи данных, Гбит/с	Примечания
ЕСМА-387 (IS)/IEC 13156)	Версия 1 принята в декабре 2008 г.	6,35 / 4,032	Персональная сеть высокоскоростной передачи данных как для потоков данных различной природы, включая мультимедийные потоки
WirelessHD	Версия 1.0 завершена в декабре 2008 г., представлена версия 1.1	~4 (10–28 – в версии 1.1)	Сеть для передачи несжатых потоков аудио/видео и других мультимедийных потоков
IEEE 802.15.3с	Завершен в октябре 2009 г.	> 5	Спецификация высокоскоростной персональной сети передачи данных. Фокус – на приложениях типа "точка–точка". Совместимость со спецификацией WirelessHD
IEEE 802.11ad	Ожидается к декабрю 2012 г.	> 1	ЛВС в диапазоне 60 ГГц. Быстрый обмен на сессионном уровне между диапазонами 60 и 2,4 / 5 ГГц
Wireless Gigabit Alliance (WiGig)	Завершен в декабре 2009 г.	> 1	Глобальная беспроводная экосистема для взаимодействия высокопроизводительных устройств. Совместима с 802.11ad



Рис.4. Структура суперкадров MAC-уровня стандарта 802.15.3

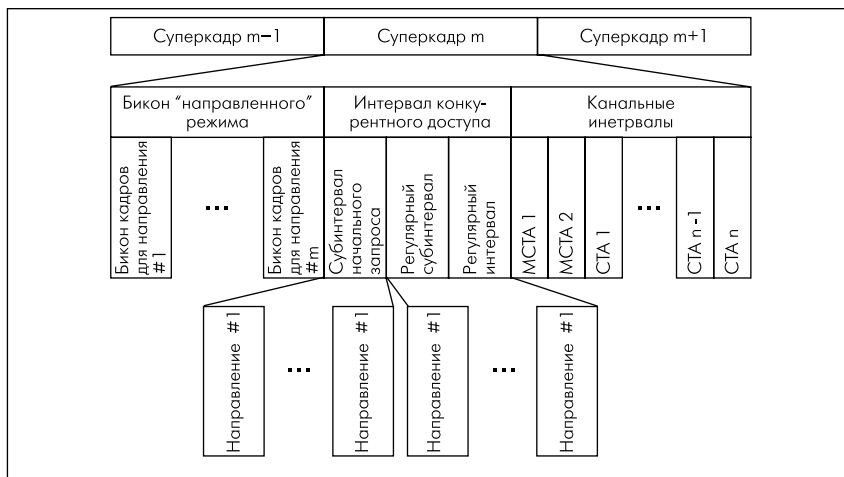


Рис.5. Структура суперкадров в квазивсенаправленном режиме стандарта 802.15.3c

связи (сотовой, WiMAX) для организации опорной сети. Такое оборудование уже производится серийно, его номенклатура и число производителей неизменно растут.

Помимо массовых коммерческих проектов (табл.3), широкое развитие получили работы по специальным сетям (системы тактической связи уровня взвода, проекты типа

ZODIAC, MAGNET и т.п.), завершатся работы по когнитивным MANET-сетям (вероятно, с возможностью динамической ретрансляции) и т.п.

Очень кратко рассмотрим основные особенности уже опубликованных и доступных спецификаций.

СТАНДАРТ IEEE 802.15.3c

IEEE 802.15.3c – это дополнение к стандарту персональных высокоскоростных сетей 802.15.3. Последний уже описан во множестве работ, в частности, в [5, 8]. Поэтому отметим лишь основные нововведения и отличия дополнения 3c, описывающего работу в диапазоне 60 ГГц.

IEEE 802.15.3c-2009 специфицирует передачу данных на скоростях до 5 Гбит/с. В стандарт добавлена возможность работы в режиме формирования диаграммы направленности (ДН) передатчика (beamforming). На MAC-уровне появилась опция агрегации различных входящих данных в единые пакеты для повышения эффективности системы связи. Предусмотрено и подтверждение прохождения отдельных субпакетов в рамках общего пакета для снижения издержек при повторной передаче.

На физическом уровне описано три режима работы:

- режим передачи на одной несущей (SC), оптимизированный для минимизации энергопотребления и сложности систем;
- режим высокоскоростного интерфейса (HSI – high-speed interface), предназначенного для двунаправленной связи с минимальными задержками;
- аудио/видеорежим (AV) для трансляции потоков несжатых данных видео и аудио высокого разрешения.

Кроме того, предусмотрена единая для всех этих режимов система сигнализации, позволяющая устройствам в рамках единой сети работать в различных режимах.

Мы не будем описывать структуру сети, адресуя читателя к источникам [4, 5, 8]. Напомним только, что сеть 802.15.3 (шпикосеть, сеть с дальностью связи не более 10 м) обеспечивает работу по принципу «каждый с каждым», при этом управление – централизованное, его реализует устройство, называемое координатором сети (PNC – piconet coordinator). Обмен реализуется последовательно суперкадров (рис.4), каждый из которых включает управляющий

Таблица 4. Параметры режима SC

Класс	Скорость передачи данных, Мбит/с		Модуляция	Коэффициент расширения	Тип кодирования FEC
	без пилотного слова	при длине пилотного слова 64			
1	25,8 (CMS)	–	$\pi/2$ BPSK / (G)MSK α	64	RS(255,239)
	412	361		4	
	825	722		2	
	1650 (MPR)	1440		1	
	1320	1160	$\pi/2$ BPSK / (G)MSK	1	LDPC(672,504)
	440	385	$\pi/2$ BPSK / (G)MSK	2	LDPC(672,336)
880	770	1			
2	1760	1540	$\pi/2$ QPSK	1	LDPC(672,336)
	2640	2310	$\pi/2$ QPSK	1	LDPC(672,504)
	3080	2700	$\pi/2$ QPSK	1	LDPC(672,588)
	3290	2870	$\pi/2$ QPSK	1	LDPC(1440,1344)
	3300	2890	$\pi/2$ QPSK	1	RS(255,239)
3	3960	3470	$\pi/2$ 8-PSK	1	LDPC(672,504)
	5280	4620	$\pi/2$ 16-QAM	1	LDPC(672,504)

заголовок (бикон), интервалы конкурентного доступа и назначенные устройствам временные интервалы для приема/передачи. При этом в «материнском» стандарте подразумевалось, что используется всенаправленная передача. В стандарте 802.15.3с могут применяться направленные антенные системы, т.е. допустим механизм пространственного разделения среды передачи. Этот режим в стандарте именуется как «квазивсенаправленный» (quasi-omni mode). При этом несколько изменяется структура суперкадров (рис.5) – для отдельных направлений формируются отдельные биконы и интервалы конкурентного доступа.

Чуть подробнее остановимся на особенностях физического уровня стандарта 802.15.3с. Три режима этого уровня предназначены для различных сценариев работы пикосети. Для всех этих режимов доступный диапазон 57–66 ГГц разбивается на четыре канала с условной шириной 2160 МГц каждый. Центральные несущие каналов – 58,32; 60,48; 62,64 и 64,80 ГГц (рис.6).

Режим с одной несущей (SC), как и следует из названия, подразумевает модуляцию одной несущей на канал. При этом возможно три класса сигнальнокодовых конструкций. Класс 1 предназначен для маломощных дешевых мобильных устройств со скоростью передачи данных до 1,5 Гбит/с. Класс 2 предусматривает скорости до 3 Гбит/с, класс 3 – до более чем 5 Гбит/с.

В режиме SC поддерживаются различные схемы квадратурной модуляции: BPSK, QPSK, 8-PSK и 16-QAM (табл.4), причем сигнальные созвездия в них повернуты против часовой стрелки на $\pi/2$. Используются два алгоритма защитного кодирования (FEC) – блочные коды Рида Соломона (RS) и низкоплотностные блочные коды с проверкой на четность (LDPC). Коды RS(255,239) и RS(33,17)* – обязательные. Кроме того, стандарт предусматривает две дополнительные схемы модуляции – OOK (включение – выключение) и DAMI (dual alternate mark inversion) (рис.7). OOK представляет собой самую простую схему модуляции (наличие сигнала несущей – 1, отсутствие – 0). Тем не менее, эта схема позволяет строить

* В скобках указывается длина кодового слова (кодированного блока) и исходного слова перед кодированием.

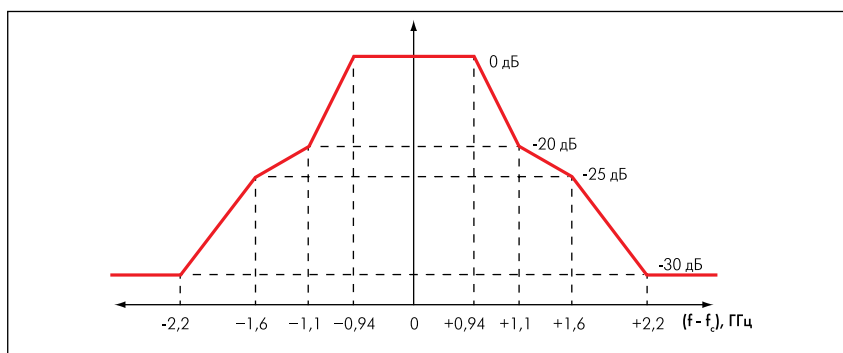


Рис.6. Спектральная маска канала при передаче в стандарте 802.15.3с

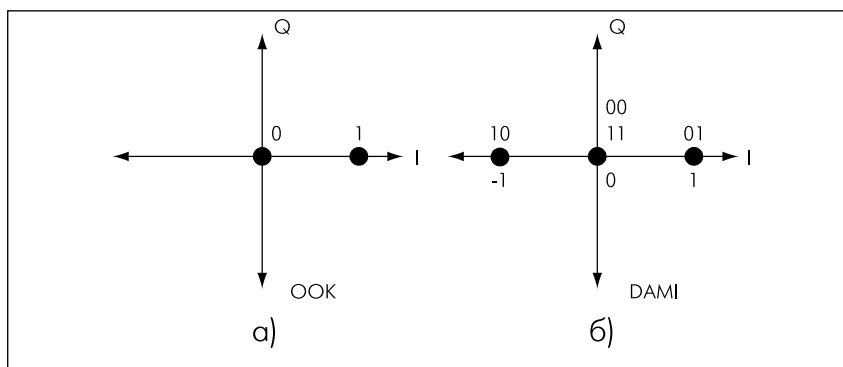


Рис.7. Сигнальные созвездия при модуляции OOK (а) и DAMI (б)

дешевые малопотребляющие устройства, незаменимые для ряда приложений. Модуляция DAMI по отношению к радиосигналу – это вариант модуляции одной боковой полосы (SSB). Один символ этой модуляции, как и в случае с OOK, несет один информационный бит. Тем не менее, скорости передачи при этом могут превышать 1,5 и 3 Гбит/с для OOK и DAMI, соответственно (табл.5).

Сигнально-кодовые схемы режима SC с наименьшей скоростью используются и в режиме общей системы

сигнализации (CMS – Common mode signaling) (см. табл.4 и 5). Режим CMS предназначен для трансляции кадров управления и синхронизации, а также командных кадров и тренировочных (подстроечных) последовательностей в режиме с формированием ДН.

В режиме SC данные передаются в виде кадров физического уровня. Кадр состоит из преамбулы, заголовка и поля данных. Преамбула представляет собой набор известных последовательностей и предназначе-

Таблица 5. Параметры режима SC для опциональных схем модуляции OOK и DAMI

Поддержка функции PNC	Режим	Скорость передачи данных, Мбит/с	Модуляция	Коэффициент расширения
Да	OOK	25,8 (CMS)	$\pi/2$ BPSK / (G)MSK	64
		818	OOK	2
		1640		1
	DAMI	25,8 (CMS)	$\pi/2$ BPSK / (G)MSK	64
3270		DAMI	1	
Нет	OOK	818	OOK	2
		1640		1
	DAMI	3270	DAMI	1

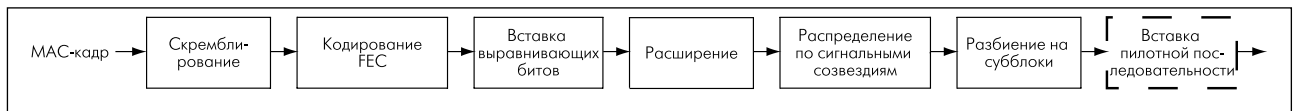


Рис.8. Последовательность процедур формирования поля данных в кадре в режиме SC стандарта 802.15.3с

на для систем автоматической регулировки усиления, выбора направления ДН, оценки частотного и временного сдвигов, синхронизации кадров, оценки качества канала и т.п. В заголовке приводится основная информация о способе обработки данных – иницилирующая последовательность для скремблирования, признак агрегации, признаки кодирования, номер сигнальнокодовой конструкции, длина кадра, тип преамбулы в следующем кадре, наличие подстроечной последовательности для формирования ДН, длина пилотного слова и др.

Поле данных в кадре формируется посредством достаточно стандартных процедур (рис.8). Важная особенность – каждый блок кодированных данных разбивается на 64 субблока. В каждый субблок может быть добавлено так называемое пилотное слово – последовательность Голея длиной 64 или 8 бит, различная для четных и нечетных блоков. Пилотные слова используются для компенсации временного и частотного сдвигов. Они аналогичны циклическим префиксам.

В кадр может быть добавлена и специальная пилотная последовательность, предназначенная для

периодической оценки качества канала.

Режим высокоскоростного интерфейса HSI использует метод модуляции посредством ортогональных несущих OFDM. Используется 512 номинальных поднесущих, из них 336 – информационных и 16 – пилотных. Частота OFDM-символов ~4,583 МГц, длительность OFDM-символа – 218,18 нс, из них длительность защитного интервала – 24,24 нс.

Поднесущие модулируются посредством различных сигнальнокодовых конструкций (табл.6). Используется квадратурная модуляция от QPSK до 64-QAM, два режима защитного кодирования – одинакового для старших и младших 8 бит и неравномерного. Применяются низкоплотностные коды с проверкой на четность LDPC(672,336), LDPC(672,504), LDPC(672,420) и LDPC(672,588), обеспечивающие скорости кодирования 1/2, 3/4, 5/8 и 7/8, соответственно.

Схема формирования OFDM-кадров совершенно стандартна – никакого разбиения на субблоки не предусмотрено, данные после защитного кодирования подвергаются перемежению, разбиваются на группы,

соответствующие квадратурным модуляционным символам, при необходимости – умножаются на расширяющие последовательности, распределяются по поднесущим, далее путем обратного Фурье-преобразования формируется OFDM-символ. Так же, как и в режиме SC, к кадру может быть добавлена пилотная последовательность.

Технология OFDM используется, чтобы обеспечить уверенный прием сигнала в условиях, когда между передатчиком и приемником нет прямой видимости, при переотражениях.

Режим аудио/видео AV также использует метод OFDM. Он предусматривает два режима передачи – высокоскоростной (HRP) и низкоскоростной (LRP) (табл.7 и 8). Схема OFDM-модуляции подобна режиму HSI (521 номинальных поднесущих, из них 336 информационных), хоть и обладает рядом незначительных отличий.

Режим AV учитывает принципиальную асимметрию систем передачи видео/аудиоданных в рамках комнаты, офиса и т.п. Соответственно устройства в режиме AV поддерживают одну из четырех возможных конфигураций:

- HRRX: высокоскоростной HRP-прием, низкоскоростные LRP-прием и LRP-передачу;
- HRTX: HRP-передачу, LRP-прием и LRP-передачу;
- HRTR: HRP-прием, HRP-передачу, LRP-прием и LRP-передачу;
- HR0: LRP-прием и LRP-передачу.

Каждому HRP-каналу (в соответствии с общим разделением 60-ГГц диапазона на каналы) соответствуют три LRP-канала. В частотном плане центральные частоты LRP-каналов расположены со сдвигом -158,625; 0 и 156,625 МГц относительно центральной частоты HRP-канала. Номинальная ширина LRP-канала – 98 МГц. Одновременно в пикосети может использоваться только один HRP-канал и один LRP-канал.

В низкоскоростном режиме при OFDM-модуляции используется 128 номинальных поднесущих, из них только 30 информационных.

Таблица 6. Скорость передачи данных для различных сигнально-кодовых конструкций в режиме HSI

Скорость данных, Мбит/с	Тип модуляции	Коэффициент расширения	Скорость FEC	
			Старшие 8 бит	Младшие 8 бит
32,1	QPSK	48	1/2	
1540	QPSK	1	1/2	
2310	QPSK	1	3/4	
2695	QPSK	1	7/8	
3080	16-QAM	1	1/2	
4620	16-QAM	1	3/4	
5390	16-QAM	1	7/8	
5775	64-QAM	1	5/8	
1925	QPSK	1	1/2	3/4
2503	QPSK	1	3/4	7/8
3850	16-QAM	1	1/2	3/4
5005	16-QAM	1	3/4	7/8

Примечательно, что в режиме LRP стандарт оговаривает применение направленных антенных систем как для всенаправленной, так и для направленной передачи. Предусмотрено до восьми переключаемых направлений передачи. В режиме всенаправленной передачи каждый OFDM-символ передается 8 или 4 раза, последовательно по каждому возможному антенному направлению. Даже если используется один антенный элемент, данные символы повторяются 8 или 4 раза.

СПЕЦИФИКАЦИЯ АЛЬЯНСА WirelessHD

Спецификация WirelessHD (версия 1.0) на физическом уровне практически полностью совпадает со стандартом 802.15.3с в режиме AV. Точнее, она просто вошла в стандарт 802.15.3с. Спецификация WirelessHD ориентирована на создание беспроводных видеосетей (wireless video area network (WVAN)). На MAC-уровне эта спецификация обладает рядом особенностей, хоть принципиально и не отличается от 802.15.3с. Одно из значимых отличий – встроенная система защиты контента от несанкционированного копирования (DTCP). В мае 2009 года было объявлено о появлении новой версии спецификации 1.1. Она, в том числе, должна обеспечивать скорости передачи до 10–28 Гбит/с на расстояниях до 10 м. Важно отметить, что использование направленной передачи, с переключением ДН, в режиме низкоскоростной трансляции – неотъемлемая часть спецификации.

Элементную базу, поддерживающую спецификацию WirelessHD, производит компания SiBeam (США). Эта компания была основана в 2004 году специалистами Калифорнийского университета в Беркли. SiBeam выступила одним из инициаторов создания альянса WirelessHD и по сути основным разработчиком/производителем элементной базы. Уже в 2008 году компания представила первый чипсет, реализующий спецификацию WirelessHD 1.0. Сегодня в портфеле компании – три комплекта чипсетов. Первым был комплект SB9120/SB9110 и SB9121/SB9111 – пара ИС для режимов HRTX и HRTX (для источников и приемников видеосигнала), соот-

Таблица 7. **Высокоскоростная передача данных в режиме AV**

Тип модуляции	Скорость кодирования		Скорость данных, Мбит/с
	4 старших бита	4 младших бита	
QPSK	1/3		952
QPSK	2/3		1904
16-QAM	2/3		3807
QPSK	4/7	4/5	1904
16-QAM	4/7	4/5	3807
QPSK	1/3	–	952
QPSK	2/3	–	1904

Таблица 8. **Низкоскоростная передача данных в режиме AV. Модуляция – только BPSK**

Скорость FEC	Скорость данных, Мбит/с	Повторение
1/3	2,5	8x
1/2	3,8	8x
2/3	5,1	8x
2/3	10,2	4x

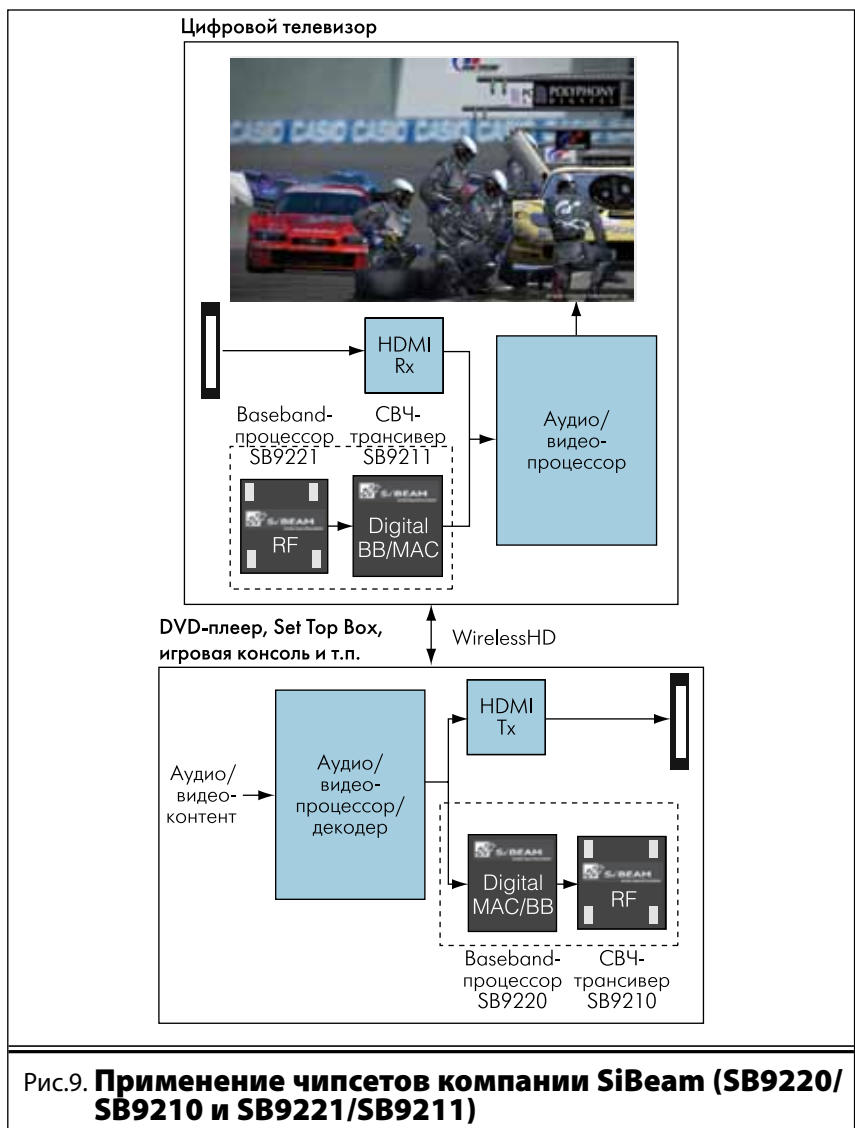


Рис.9. **Применение чипсетов компании SiBeam (SB9220/SB9210 и SB9221/SB9211)**

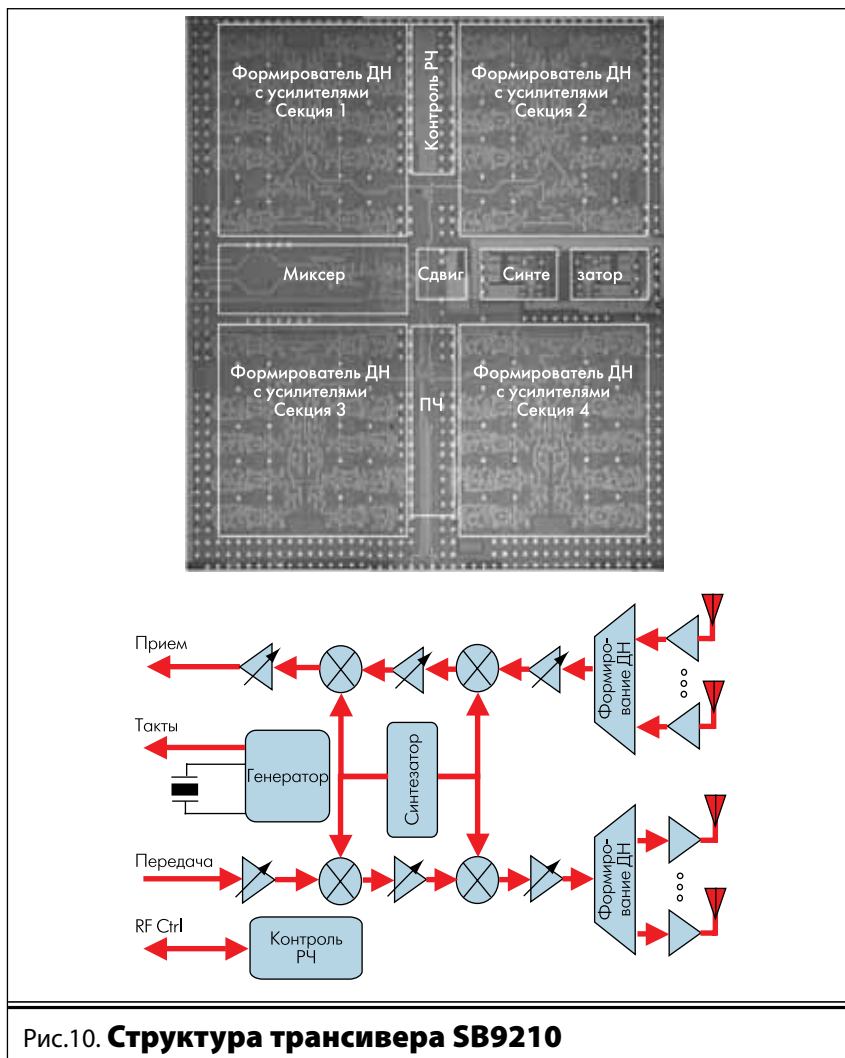


Рис.10. Структура трансивера SB9210

ветственно. В комплект входит ИС трансивера (SB9110 или SB9111) и baseband-процессор (SB9120 или SB9121) (рис.9–11). Примечательно, что в ИС трансивера встроена 36-элементная антенная решетка, позволяющая реализовывать фирменную технологию OmniLink60 для динамического формирования ДН.

Следующий комплект ИС – SB9220/SB9210 и SB9221/SB9211 – незначительно отличается от предшественников. Во встроенной антенной решетке используется 32 элемента. В результате при мощности передатчика до 10 дБм эквивалентная мощность в антенне достигает 40 дБм. Примечательно, что никаких внешних СВЧ-элементов или антенн для работы 60-ГГц чипсетов SiBeam не требуется. Разработчик систем не должен заниматься СВЧ-дизайном, используя новую элементную базу как стандартный интерфейсный модуль.

Самое примечательное – как baseband-процессор, так и СВЧ-трансивер выполнены по кремние-

вой КМОП-технологии. Компания SiBeam изначально выбрала курс на применение этой самой массовой и дешевой технологии, так как ориентировалась на массовый рынок потребительской электроники. Поскольку чипсеты предназначены для применения в пикосетях, с максимальным ограничением мощности передатчика на уровне 10 мВт, разработчикам удалось обойтись без гораздо более дорогих технологий на основе GaAs или InP.

В мае 2010 года компания объявила о выпуске ИС нового, двухрежимного трансивера SB8110, поддерживающего требования как спецификации WirelessHD 1.0, так и только что появившейся спецификации альянса Wireless Gigabit.

Чипсеты SiBeam уже используются в ряде продуктов. Телевизоры с реализованным интерфейсом WirelessHD выпускают компании Panasonic (TC-P54Z1), LG (55LH95-UA) и Sony (BRAVIA XBR10). Комплекты беспроводных удлинителей HDMI представили фирмы Abocom, Best Buy, Gefen и Cables To Go.

Отметим, что решения на основе спецификаций WirelessHD – это лишь «первые ласточки» нового 60-ГГц диапазона, но уже они показывают принципиальную новизну нового направления. Однако основные события лишь впереди. И европейский стандарт ECTMA-387, и спецификация WiGig в большей

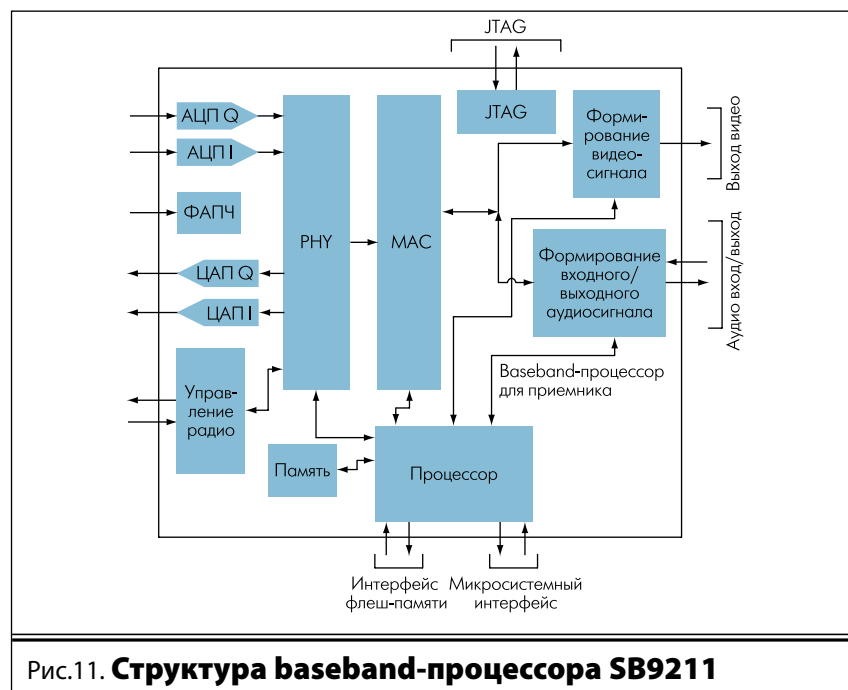


Рис.11. Структура baseband-процессора SB9211

степени ориентированы именно на сети передачи данных, а не только на видеосети. Пока они, за редким исключением, не имеют промышленного воплощения, но громкие имена производителей элементной базы, стоящие за этими спецификациями, позволяют однозначно утверждать: это дело весьма близкого будущего. Очень многие ведущие производители элементной базы и систем связи (Intel, IBM, Alcatel и др.) уже направляют свои технологические изыскания и возможности, поисковые усилия на массовое, промышленное освоение 60-ГГц диапазона. И произойдет это, по нашей оценке, не позднее 2011–2013 годов. И если не предпринять специальных мер, Россия в очередной раз останется наблюдать, как ведущие страны снимают пенки с новой инновационной волны.

А ведь когда зарубежные компании захватят коммерческий рынок, они будут безраздельно доминиро-

вать и в сфере специальных систем. Последствия для России очевидны.

В следующей публикации мы более подробно остановимся на стандарте ECMA-387 и элементной базе для работы в диапазоне 60 ГГц.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN/ Под ред. Xiao, Shao-Qiu et al. – CRC Press, 2008.
2. **Шахнович И.** Сверхширокополосная связь. Второе рождение? – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №4, с.8–15.
3. IEEE Std 802.15.3c-2009. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension. – IEEE, 12 October 2009.
4. IEEE Std 802.15.3 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). – IEEE, 29 September 2003.
5. **Шахнович И.** Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15.3 и 802.15.4. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 6, с.32–36.
6. ISO/IEC 13156:2009(E). Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – High rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL. – ISO/IEC, 2009.
7. **Викулов И.** 4-мм системы связи. Начало реализации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №2, с.54–57.
8. **Шахнович И.** Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2004.
9. **Харкевич А.А.** Основы радиотехники. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1962.