

УДК 621.396:621.397:006.354

РОССИЙСКАЯ СИСТЕМА ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО РАДИОВЕЩАНИЯ

В.П. Дворкович, заместитель директора ФГУП «ГРЧЦ», д.т.н., профессор; v.dvorkovich@grfc.ru

А.В. Дворкович, начальник управления ФГУП «ГРЧЦ», д.т.н., профессор; a.dvorkovich@grfc.ru

Ключевые слова: цифровое мультимедийное вещание, ОВЧ-диапазон, реальное время, аудиовизуальная информационная система, канальное кодирование, модуляция, диапазон.

Возможно ли разработать в России систему и национальный стандарт цифрового мультимедийного вещания? Возможно! А что дальше?

Первое в мировой практике предложение по реализации цифрового мультимедийного вещания в ОВЧ-диапазоне, где предусматривалась возможность трансляции информационного ТВ, содержащего динамические цветные изображения со стереофоническим звуковым сопровождением, было изложено в патенте РФ № 2219676 с приоритетом от 08.11.2000 [1]. Создание первой модели системы в 2003–2005 гг. профинансировало ГУ «Российский фонд технологического развития» Минпромнауки России. Результаты исследований опубликованы в [2].

Дальнейшее продвижение системы связано с НИР «Разработка системы кодирования аудиовизуальной информации и ее передачи в узкополосном канале для мобильного потребителя», выполненной по контракту с Федеральным агентством по науке и инновациям в 2008–2009 гг. В процессе работы над системой, получившей название «Аудиовизуальная информационная система реального времени – РАВИС», было представлено 8 вкладов России в сектор радиосвязи МСЭ (ITU-R) [3–10] и 8 – в Комитет по электронным средствам связи (ЕСС) Европейской конференции административных почт и электросвязи (СЕРТ) [11–18].

Можно сказать, что разработанная в России система признана на международном уровне: на базе вкладов России материалы по РАВИС включены в отчеты ITU-R WT.2049-4 «Вещание приложений мультимедиа и данных для мобильного приема» [19] и BS.[PLAN_PAR] «Параметры планирования для систем наземного цифрового звукового вещания в полосах ОВЧ» [20], в отчеты ЕСС 117 «Управление переходом к цифровому звуковому вещанию в частотных полосах ниже 80 МГц» [21] и 141 «Возможности будущей цифровизации полосы II» [22]. Разработана новая рекомендация ITU-R BS.[MULT-FM] «Требования для расширенных мультимедийных сервисов цифрового наземного вещания в полосах I и II ОВЧ-диапазона» [23].

В соответствии с Решением ГКРЧ № 09-04-03 от 19.08.2009 [24] в период с августа 2009 г. по апрель 2010 г. ФГУП «ГРЧЦ» были проведены натурные испытания модели РАВИС в Москве и Сочи (Краснодарский край). Результаты испытаний одобрены Решением ГКРЧ № 10-08-05 от 23.08.2010, и ГКРЧ приняла решение о выделении ФГУП «ГРЧЦ» полос радиочастот 66–74 и 87,5–108 МГц для разработки радиоэлектронных средств системы РАВИС и организации проведения соответствующих ОКР [25].

Проект создания ответственной системы мобильного мультимедийного вещания РАВИС, одобренный 1 марта 2011 г. Рабочей группой № 6 «Космос и телекоммуникации»

Комиссии по модернизации и технологическому развитию России при Президенте РФ, рекомендован для включения в программу ФИЦ «Сколково».

В феврале 2011 г. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии Минпромторга России утвердило новый национальный стандарт ГОСТ Р 54309-2011 «Аудиовизуальная информационная система реального времени (РАВИС). Процессы формирования кадровой структуры, канального кодирования и модуляции для системы цифрового наземного узкополосного радиовещания в ОВЧ-диапазоне. Технические условия» [26] (приказа № 22-ст от 24.02.11 с введением в действие 1 сентября 2011 г.). Стандарт устанавливает основные принципы построения системы для цифрового наземного узкополосного вещания РАВИС и определяет процессы формирования кадровой структуры, методов канального кодирования, мультиплексирования и модуляции системы.

Особенности и преимущества РАВИС. РАВИС – это система цифрового наземного звукового и мультимедийного радиовещания, предназначенная для работы в УКВ-диапазоне частот. В настоящее время под аналоговое ЧМ-вещание отведено две полосы в этом диапазоне: 65,8–74 МГц и 87,5–108 МГц (при этом подполоса 92–100 МГц занята 5-м ТВ-каналом). В первой полосе используется принятая в СССР система с полярной модуляцией (OIRT FM), во второй – международная ЧМ-система с пилот-тоном. Вторая полоса интенсивно используется для стереофонического радиовещания (в Москве в этом диапазоне работают около 50 радиостанций), а первая задействована незначительно.

Структура РАВИС, ее достоинства и результаты испытаний довольно подробно изложены в [27, 28].

В числе достоинств системы:

- существенное (более чем в 10 раз) повышение эффективности использования радиовещательных полос ОВЧ-диапазона частот (65,8–74 и 87,5–108 МГц) благодаря возможности передачи в одном стандартном радиоканале ЧМ-вещания более 10 звуковых стереопрограмм СД-качества или нескольких программ многоканального звука;
- возможность трансляции видеопрограмм для мобильного потребителя и реализации ТВ-вещания в малонаселенных пунктах; резкое удешевление системы вещания;
- возможность создания одночастотных сетей вещания для мобильного приема вдоль шоссе и железнодородных путей сообщения (например, на магистралях Москва–Санкт-Петербург и Москва–Владивосток);
- реализация эфирных систем локального оповещения населения и организаций в условиях чрезвычайных ситуаций;
- внедрение РАВИС в СНГ и ряде развивающихся стран, активное интегрирование России в общемировую систему цифровых телекоммуникаций на базе российского стандарта (утверждение международного стандарта);

- организация отечественного производства аппаратуры и сетей вещания РАВИС, создание новых рабочих мест;
- существенное (в десятки раз) снижение энергопотребления радиопередающих средств.

При использовании системы РАВИС конкурентные преимущества получают все категории потребителей:

- *слушатели* – высококачественное звуковое вещание (стереофоническое и многоканальное), новые мультимедийные сервисы (видео, текст, дополнительные данные, электронную программу передач и т.д.), простую настройку на станцию по названию, жанру и др.;

- *производители* – массовую замену старых аналоговых приемников, модернизацию передающих средств при сохранении инфраструктуры, а также общий рост потенциала рынка передающих и приемных средств;

- *вещатели* – снижение потребляемой мощности, приходящейся на одну программу, расширение зоны охвата, увеличение количества и качества программ и спектра предлагаемых потребителям сервисов, возможность адаптации к потребностям как больших, так и малых вещателей;

- *регуляторные органы* – повышение эффективности использования спектра, возможность сохранения частотных распределений, простых процедур лицензирования, координацию в рамках международно признанной системы.

Система РАВИС построена по схеме COFDM-модуляции, сочетающей высокую спектральную эффективность с хорошей помехозащищенностью как от гауссовского шума, так и от других помех, таких как многолучевое распространение сигнала и эффект Доплера.

Одним из ключевых условий при разработке РАВИС было сохранение частотных распределений – полоса радиоканала в системе должна укладываться в полосу радиоканала аналогового ЧМ-вещания. Поэтому максимальная ширина полосы радиоканала РАВИС составляет 250 кГц. Предусмотрены и более узкополосные варианты – 200 и 100 кГц. Отличительная особенность системы – интервал между несущими не зависит от ширины полосы радиоканала, при изменении полосы меняется количество несущих.

В системе предусмотрено несколько возможных значений параметров канального кодирования и модуляции, что позволяет организовывать вещание в различных условиях окружающей среды и помеховой обстановки, обеспечивая вещателю возможность выбора между надежностью и скоростью передачи данных в системе, а также организации вещания в одночастотных сетях.

Наряду с логическим каналом основного сервиса (КОС) можно сформировать два дополнительных – канал низкоскоростных данных с повышенной надежностью передачи (НСК, пропускная способность около 12 кбит/с) и канал высоконадежной передачи данных (НКД, пропускная способность около 5 кбит/с). Логические каналы могут исполь-

Таблица 1

Тип созвездия	Скорость кода	Скорость потока данных, кбит/с		
		канал 100 кГц	канал 200 кГц	канал 250 кГц
QPSK	1/2	80	160	200
	2/3	100	210	270
	3/4	120	240	300
16-QAM	1/2	150	320	400
	2/3	210	420	530
	3/4	230	470	600
64-QAM	1/2	230	470	600
	2/3	310	630	800
	3/4	350	710	900

зоваться, например, в системах оповещения о чрезвычайных ситуациях и т.п.

Данные в логических каналах передаются порциями, которые называются кадрами данных (КД). Размер КД в логическом КОС зависит от полосы радиоканала, скорости канального кодирования и наличия (или отсутствия) дополнительных каналов. Допустимые скорости канального кодирования – 1/2, 2/3, 3/4; допустимые типы модуляции КОС – QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Скорости потоков данных в одном радиоканале для всех комбинаций модуляционного созвездия и скорости помехоустойчивого кодирования приведены в табл. 1 (в КОС при отсутствии НСК и НКД).

Размер кадра данных в НСК – 656 бит, скорость канального кодирования – 1/2, тип модуляции – QPSK. Данные канала передаются на 32 информационных несущих. Размер КД в НКД – 533 бит, скорость канального кодирования – 1/2, тип модуляции – BPSK. Данные канала передаются на 26 информационных несущих. При отсутствии каналов НСК и/или НКД их несущие используются для КОС.

Интервал между несущими составляет 4000/9 Гц и, как уже было сказано, не зависит от ширины полосы радиоканала. Длительность полезной части символа OFDM – 2,25 мс, длительность защитного интервала – 1/8. Кадр OFDM состоит из 41 символа.

Структурная схема передающей части РАВИС приведена на рис. 1. Составные части блока обработки, канального кодирования и перемежения входных данных в каждом из трех каналов системы представлены на рис. 2.

Кодирование источника. На входы каналов КОС, НСК и НКД подаются двоичные данные, переносящие различную информацию (в первую очередь видео и звук), которая должна предварительно кодироваться для устранения как статистической избыточности, так и избыточности восприятия (визуальной, звуковой). В настоящее время наиболее перспективными для использования в системе РАВИС являются звуковой кодер HE-AAC [29] (включая кодирование SBR, PS,

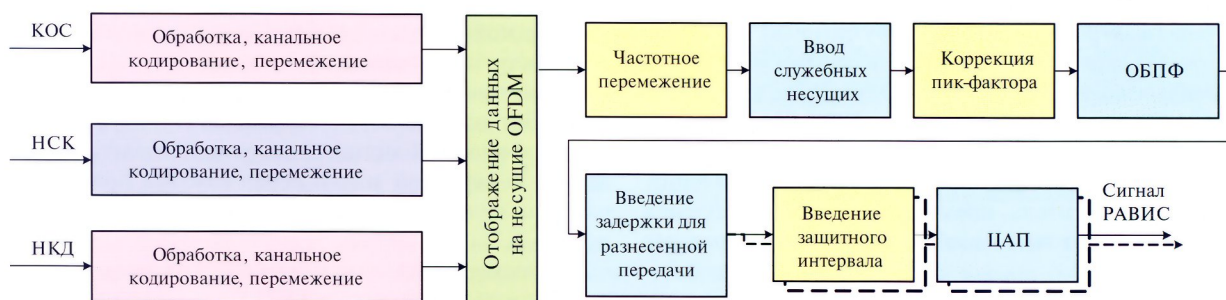


Рис. 1

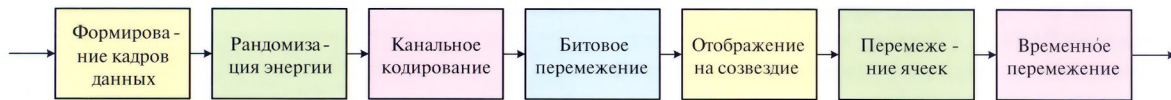


Рис. 2

MPEG Surround [30]) и видеокодер H.264/AVC [31]. Кодер HE-AAC позволяет передавать в потоке от 32 кбит/с высококачественный стереозвук, а в потоке от 84 кбит/с – многоканальный звук формата 5.1. Кодер H.264/AVC обеспечивает видео высокого качества формата CIF 25 кадров/с при потоке менее 500 кбит/с. Закодированные данные источников мультиплексируют с использованием различных форматов, включая пакеты постоянной (в том числе транспортный поток MPEG-2 [32]) и переменной длины. Таким образом, система РАВИС может служить эффективной транспортной средой для любых типов данных.

Система канального кодирования и OFDM-модуляции – это функциональный блок, выполняющий адаптацию данных от выхода кодера источника сигнала к характеристикам канала. Потоки данных всех логических каналов (КОС, НСК, НКД) проходят следующие стадии обработки:

- формирование КД;
- рандомизацию распределения энергии КД;
- внешнее кодирование КД (блочный код Боуэ–Чоудури–Хоквингема, БЧХ);
- внутреннее кодирование КД (блочный код LDPC – код с малой плотностью проверок на четность);
- битовое перемежение помехозащищенных кадров данных (ПКД);
- отображение битов на ячейки модуляционного созвездия;
- перемежение ячеек в рамках одного или нескольких ПКД;
- временное перемежение в рамках одного или нескольких ПКД;
- отображение данных всех логических каналов на ячейки OFDM;
- частотное перемежение и ввод служебных несущих;
- коррекцию пик-фактора (опционально);
- обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ);
- введение защитного интервала и формирование полного сигнала OFDM.

Блок адаптации входного потока играет роль интерфейса и обеспечивает подключение к кодеру канала любого входного потока со скоростью не выше заданной, а также формирует элементарные КД для дальнейшей обработки кодером канала.

Блок рандомизации осуществляет рассеивание энергии двоичного цифрового потока, превращая длинные последовательности идущих подряд нулей или единиц в псевдослучайную двоичную последовательность, обеспечивая энергетический выигрыш при дальнейшем формировании радиосигнала (выигрыш по пик-фактору сигнала).

Блок помехозащитного кодирования состоит из двух помехоустойчивых кодеров – БЧХ и LDPC. Выходная длина ПКД после канального кодирования для КОС зависит от полосы радиоканала, а также от наличия или отсутствия НСК и НКД. Длина ПКД для НСК – 1312 бит, для НКД – 1066 бит.

Битовый перемежитель предназначен для ослабления влияния пакетных битовых ошибок и работает в пределах одного ПКД.

Блок модуляции отображает последовательность групп битов (1 – BPSK, 2 – QPSK, 4 – 16-QAM, 6 – 64-QAM) на

точки выбранного сигнального созвездия, формируя ячейки данных.

Перемежитель ячеек представляет собой частотный перемежитель, обеспечивающий дополнительную устойчивость сигнала к частотным замираниям в канале.

Временный перемежитель предназначен для глубокого перемежения одного или нескольких ПКД для защиты от временных замираний канала и присутствует только в КОС.

Мультиплексор потоков формирует из поступающих на его вход модулированных ячеек данных различных каналов OFDM-символы. При этом каждый канал отображают на определенное число несущих: НСК – на 32, НКД – на 26. Число несущих КОС зависит от используемой полосы радиочастотного канала и наличия или отсутствия дополнительных каналов. После отображения данных всех каналов на несущие OFDM осуществляется частотное перемежение, в результате которого низкоскоростные надежные потоки передаются на различных несущих в различных символах OFDM, повышая тем самым устойчивость системы передачи данных к частотно-селективным замираниям. Кадр OFDM состоит из 41 символа OFDM. Размер ПКД в логическом канале данных равен произведению числа несущих OFDM, соответствующих логическому каналу данных, на число символов в кадре OFDM.

Далее в мультиплексированный поток OFDM-символов вводятся пилотные несущие и несущие параметров передачи сигнала (ППС), обеспечивающие на стороне приема возможность синхронизации, коррекции канальных искажений и передачи дополнительной информации, в том числе о параметрах модуляции и канального кодирования, наличия различных каналов данных и пр.

Коррекция пик-фактора сигнала не является обязательной, но рекомендуется. Один из возможных алгоритмов коррекции пик-фактора (метод активного расширения созвездия) приведен в приложении к стандарту [26].

На выходе ОБПФ формируют временной дискретизированный сигнал, поступающий после введения защитного интервала на вход блока ЦАП. При использовании разнесенной передачи до ввода защитного интервала вводится задержка сигнала.

Формирование КД и рандомизация распределения энергии. Размер КД, состоящего из заголовка, полезной нагрузки и заполнения, зависит от параметров канального кодирования и равен размеру некодированного блока БЧХ-кода K_{bch} .

В качестве полезной нагрузки могут быть использованы транспортные пакеты (ТП) MPEG-2, пакетные данные, а именно пакеты фиксированной или переменной длины, пакеты протокола универсальной инкапсуляции потока (GSE) [33], неструктурированный поток данных (НСПД).

Заголовок КД включает в себя следующие поля:

- битовые флаги, указывающие тип потока данных, наличие временной метки первого пользовательского пакета данных в заголовке и/или перед каждым пользовательским пакетом, наличие пакетов переменной длины и порядкового номера КД;
- размер пользовательских пакетов данных (для пакетов постоянной длины, кроме ТП);
- размер поля данных (полезной нагрузки) КД;

- сдвиг начала синхронизации – первого полного пользовательского пакета (отсутствует в режиме НСПД);
- временная метка первого полного пользовательского пакета (при установке соответствующего флага в поле битовых флагов);
- порядковый номер КД (при установке соответствующего флага в поле битовых флагов);
- контрольная сумма CRC-8 полей заголовка.

Полезная нагрузка, представляющая собой пользовательские данные, следует после заголовка. Ее размер записан в поле длины данных заголовка и не может превышать размера КД минус размер заголовка. Заполнение (производится нулями) следует после полезной нагрузки, если ее размер плюс размер заголовка меньше размера КД.

Размер заголовка КД составляет 4–12 байт и зависит от типа данных полезной нагрузки, переменной или фиксированной длины пакетов, наличия временной метки пакетов и номера КД.

Кадры данных рандомизируются (скремблируются) путем выполнения операции XOR с псевдослучайной двоичной последовательностью (ПСДП). Загрузка инициализирующей последовательности ПСДП проводится в начале обработки каждого КД.

Подсистема канального кодирования. Подсистема канального кодирования выполняет внешнее кодирование БЧХ, внутреннее кодирование LDPC и побитовое перемежение. Входной поток состоит из КД, а выходной – из ПКД.

Каждый КД, содержащий K_{bch} бит, обрабатывается подсистемой канального (помехозащитного) кодирования для формирования ПКД, содержащего N_{ldpc} бит. $N_{bch} - K_{bch}$ проверочных битов систематического внешнего кода БЧХ должны быть присоединены в конце КД, увеличивая таким образом размер КД до $N_{bch} = K_{bch}$ бит. $N_{ldpc} - K_{ldpc}$ проверочных битов внутреннего кодера LDPC должны быть присоединены после проверочных битов БЧХ.

Для генерации ПКД код БЧХ (N_{bch}, K_{bch}), корректирующий t ошибок, должен быть применен к каждому КД. Для получения порождающего полинома $g(x)$ кода коррекции t ошибок кодера БЧХ следует перемножить первые t примитивных полиномов, приведенных в стандарте и соответствующих N_{bch} . Параметры канального кодирования и размеры КД для всех каналов передачи данных приведены в табл. 2.

Кодер LDPC обрабатывает выход внешнего кодирования как блок информации размером K_{ldpc} бит и систематически кодирует его в кодовое слово размером N_{ldpc} бит.

Матрица \mathbf{H} , используемая для расчета проверочных битов кода LDPC, имеет размерность $[K_{ldpc}, M_{ldpc}]$ и содержит относительно малое число ненулевых элементов $h_{n,m} = 1$, нерегулярно распределенных по строкам и столбцам. В стандарте приведен алгоритм генерации матрицы \mathbf{H} для всех возможных значений N_{ldpc} .

Выход кодера LDPC подвергается побитовому перемежению, т.е. перемежению со сдвигом начала столбцов. При этом биты данных, поступающие от кодера LDPC, последовательно записываются в перемежитель по столбцам и последовательно считываются по строкам (старший бит заголовка ПКД считывается первым) (рис. 3). Запись стартовой позиции каждого столбца сдвигается на величину t_c , заданную в стандарте таблично. Число строк побитового перемежителя $N_r = 41$, число столбцов $N_c = N_{ldpc} \div N_r$.

Отображение битов на ячейки, формирование модуляционных созвездий. Один или несколько ПКД должны быть преобразованы в кодированный и модулированный блок помехозащищенных данных (БПД). Для этого поток входных

Таблица 2

Примерная скорость кода	Некодированный блок БЧХ K_{bch}	Кодированный блок БЧХ N_{bch} , Некодированный блок LDPC K_{ldpc}	Коррекция t ошибок БЧХ-кода	$N_{bch} - K_{bch}$	Кодированный блок LDPC N_{ldpc} (число несущих в канале данных)
Канал основного сервиса (КОС), радиоканал 100 кГц					
1/2	3904	4024		120	8 036 КОС
2/3	5232	5362		130	(196 несущих)
3/4	5896	6026		120	6 970
1/2	3368	3488		130	КОС (170 несущих) + НКД
2/3	4520	4650	10	120	6 724
3/4	5096	5226		130	КОС (164 несущие) + НСК
1/2	3248	3368		120	5 658
2/3	4352	4482		130	КОС (138 несущих) + НСК + НКД
3/4	4912	5042		120	6 724
1/2	2712	2832		130	5 658
2/3	3656	3776		120	КОС (138 несущих) + НСК + НКД
3/4	4112	4242		130	6 724
Канал основного сервиса (КОС), радиоканал 200 кГц					
1/2	8056	8196		140	16 400 КОС (400 несущих)
2/3	10792	10932		130	15 334
3/4	12160	12300		140	КОС (374 несущие) + НКД
1/2	7536	7666		130	15 088
2/3	10088	10228	10	140	КОС (368 несущих) + НСК
3/4	11360	11500		140	15 088
1/2	7416	7546		130	КОС (342 несущие) + НСК + НКД
2/3	9920	10060		140	14 022
3/4	11176	11316		140	КОС (342 несущие) + НСК + НКД
1/2	6880	7010		140	14 022
2/3	9208	9348		140	КОС (342 несущие) + НСК + НКД
3/4	10376	10516		140	14 022
Канал основного сервиса (КОС), радиоканал 250 кГц					
1/2	10192	10332		140	20 664 КОС
2/3	13640	13780		140	(504 несущие)
3/4	15360	15500		140	19 598
1/2	9664	9804		140	КОС (478 несущих) + НКД
2/3	12928	13068	10	140	19 352
3/4	14560	14700		140	КОС (472 несущие) + НСК
1/2	9536	9676		140	18 286
2/3	12760	12900		140	КОС (446 несущих) + НСК + НКД
3/4	14376	14516		140	18 286
1/2	9008	9148		140	КОС (446 несущих) + НСК + НКД
2/3	12048	12188		140	18 286
3/4	13576	13716		140	КОС (446 несущих) + НСК + НКД
Низкоскоростной канал (НСК)					
1/2	592	652	6	60	1 312 (32 несущие)
Надежный канал данных (НКД)					
1/2	472	532	6	60	1 066 (26 несущих)

битов разделяется на кодовые слова ячеек, а затем эти слова отображаются на модуляционное созвездие. Эффективное число битов на ячейку модуляции n_{MOD} : для 64-QAM – 6, для 16-QAM – 4, для QPSK – 2 и для BPSK – 1. Блок помехо-

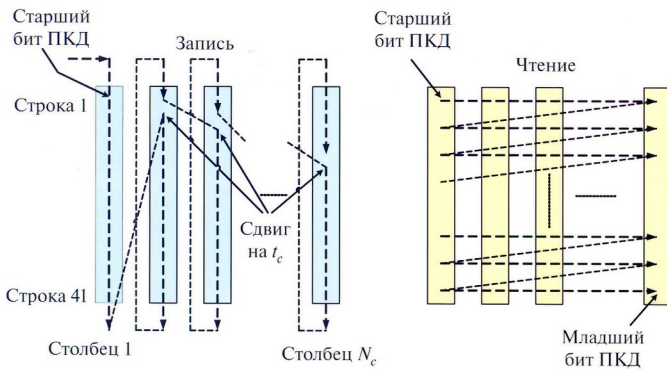


Рис. 3

защищенных данных состоит из n_{MOD} ПКД, следовательно, число ячеек выходных данных в нем равно N_{ldpc} .

Разделение последовательности битов на модулирующие значения ячеек происходит следующим образом: битовый поток, поступающий от битового перемежителя, разделяется (демультиплексируется) на $N_{substreams} = n_{MOD}$ подпотоков.

Каждое кодовое слово ячеек, поступающее от демультиплексора, должно быть отображено на точку созвездия одного из типов (BPSK, QPSK, 16-QAM или 64-QAM) для получения точки созвездия z_q до нормализации. При этом используется отображение Грея. Коэффициент нормализации равен 1 для BPSK, $1/\sqrt{2}$ – для QPSK, $1/\sqrt{10}$ – для 16-QAM и $1/\sqrt{42}$ – для 64-QAM.

Перемежение ячеек, временное перемежение. Псевдослучайный перемежитель ячеек должен равномерно распределять ячейки в БПД, обеспечивая в приемнике декорреляцию канальных искажений, и сдвигать последовательность перемежения в БПД на протяжении одного блока временного перемежения.

Вход перемежителя ячеек $(g_{r,0}, g_{r,1}, \dots, g_{r,N_{cells}-1})$ должен представлять собой ячейки данных БПД с индексом r , сформированным с помощью созвездия (r – увеличивающийся индекс БПД внутри блока временного перемежения (БВП)). Этот индекс сбрасывается в нуль в начале каждого БВП. Выход перемежителя ячеек должен представлять собой вектор $(d_{r,0}, d_{r,1}, \dots, d_{r,N_{cells}-1})$, определенный выражением $d_{r,L_r(q)} = g_{r,q}$ для каждого $q = 0, 1, \dots, N_{cells} - 1$, где N_{cells} – число выходных ячеек данных на БПД (равное N_{ldpc}); $L_r(q)$ – функция перестановки, применяемая к r -му БПД в рамках БВП и определяемая как $L_r(q) = (qK_r) \bmod N_{cells}$; значения K_r заданы в стандарте таблично. БВП состоит из одного или нескольких БПД. Его отображают на целое число кадров OFDM. Длительность БВП N_T , выраженная в кадрах OFDM, передается в ППС и составляет от 1 до 6.

Временной перемежитель представляет собой строчно-столбцовый блочный перемежитель, аналогичный битовому перемежителю, но без сдвига начала столбцов. Число столбцов $N_{Tc} = 41$ в перемежителе равно числу символов в кадре OFDM. Данные ячеек записывают в столбцы, а считывают построчно. Число строк временного перемежителя $N_{Tr} = (N_{cells} N_T) \div N_{Tc}$.

Общая схема OFDM-модуляции. После блоков перемежения цифровые потоки логических каналов (КОС, НСК и НКД) поступают на блок отображения данных на несущие OFDM (табл. 3). При OFDM-модуляции цифровые потоки логических каналов данных разбиваются на блоки длиной $L=41$ символ комплексной модуляции z_q , причем каждый такой символ имеет длину n_{MOD} бит. Далее в соответствии с кодом Грея осуществляется отображение z_q на информа-

Таблица 3

Полоса радиоканала f , кГц	Общее число несущих OFDM K_{total}	Число несущих				
		пилотных	ППС	КОС	НСК	НКД
100	215	15 (8 рассеянных, 7 повторяющихся)	4	196	-	-
				170	-	26
				164	32	-
				138	32	26
200	439	35 (22 рассеянных, 13 повторяющихся)	4	400	-	-
				374	-	26
				368	32	-
				342	32	26
250	553	45 (28 рассеянных, 17 повторяющихся)	4	504	-	-
				478	-	26
				472	32	-
				446	32	26

ционные несущие OFDM-символа согласно выбранному варианту модуляции несущих (BPSK, QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Осуществляемое после этого частотное перемежение делает распределение логических каналов по несущим псевдослучайным, повышая устойчивость системы передачи данных к селективным замираниям.

Помимо информационных несущих в состав OFDM-символа вводятся пилотные несущие и несущие ППС. Пилотные несущие передаются на повышенном уровне мощности, а их фазы задаются в соответствии с опорной псевдослучайной двоичной последовательностью равными 0° либо 180° .

Пилотные несущие, на долю которых приходится около 9 % от общего числа несущих, призваны обеспечить на принимающей стороне возможности синхронизации сигнала и оценки характеристик канала передачи.

Несущие ППС вводятся для непосредственной передачи информации о ключевых параметрах передаваемого сигнала (наличие логических каналов данных, скорость LDPC-кода, тип QAM-созвездия, длина защитного интервала и др.). В каждом символе OFDM передаются четыре несущие ППС.

OFDM-символ после введения в его состав пилотных и ППС-несущих подвергается ОБПФ – из частотной области во временную. Затем в начало символа вводится защитный интервал длительностью T_G , куда копируются последние $N_{symp} T_G / T_U$ отсчетов полезной части символа (циклический префикс), где N_{symp} – длина полезной части символа (в отсчетах); T_U – длительность полезного символа (в секундах). В системе предусмотрен защитный интервал длительностью $T_G = T_U / 8$.

Полученная последовательность временных отсчетов ограничивается по уровню, масштабируется и квантуется в соответствии с разрядностью ЦАП. Перед ОБПФ может проводиться операция, направленная на снижение пик-фактора сигнала. При использовании разнесенной передачи перед введением защитного интервала блок внесения задержки формирует несколько сигналов с необходимыми временными задержками.

Кадровая структура OFDM. Передаваемый сигнал должен быть организован в виде последовательности кадров. Кадр имеет длительность T_F и состоит из $L=41$ OFDM-символов. OFDM-символ имеет длительность T_S и состоит из защитного интервала длительностью T_G и полезной части длительностью T_U ($T_S = T_U + T_G$). OFDM-символы содержат полезную информацию (о данных) и опорную информацию (пилотные

и ППС-несущие). Символы в кадре OFDM пронумерованы от 0 до 40. Ключевые параметры блока OFDM-модуляции системы приведены в табл. 4.

Математическая модель сигнала $s(t)$ описывается выражением

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} C_{m,l,k} \Psi_{m,l,k}(t) \right\}, \quad (1)$$

где

$$\Psi_{m,l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k'}{T_U}(t-T_G-IT_S-LmT_S)}, & (l+Lm)T_S \leq t \leq (l+Lm+1)T_S, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

K_{\min} – нижний предел индекса несущей, $K_{\min}=0$; K_{\max} – верхний предел индекса несущей, $K_{\max}=K_{\text{total}}-1$; L – число символов OFDM в кадре, $L=41$; k – индекс несущей; $k' = k - (K_{\max} + K_{\min}) / 2$; l – индекс символа OFDM в кадре; m – индекс передаваемого кадра; f_c – центральная частота спектра сигнала; $C_{m,l,k}$ – комплексный коэффициент, модулирующий k -ю несущую l -го символа в m -м кадре OFDM.

С целью нормирования выходного уровня сигнала в системе предусмотрены коэффициенты нормализации величин $C_{m,l,k}$. Применение этих коэффициентов нормирует к единице суммарную мощность модуляционного алфавита информационных несущих сигнала.

Частотное перемежение, выполняемое после отображения данных логических каналов на информационные несущие, делает распределение логических каналов по несущим псевдослучайным, что позволяет повысить устойчивость низкоскоростных каналов данных НСК и НКД к селективным замираниям.

Модулированные ячейки данных НСК и НКД отображаются псевдослучайным образом на информационные несущие OFDM с индексами $k' = \pm 1, \dots, \pm 106$ относительно центральной несущей радиоканала. Отображение задано в стандарте таблично. После отображения данных каналов НСК и НКД модулированные ячейки данных КОС отображаются на информационные несущие с индексами $k = K_{\min} + 1, \dots, K_{\max} - 1$ последовательно, за исключением информационных несущих, уже занятых каналами НСК и НКД.

Пилотные несущие. Их назначение – передача дополнительной (опорной) информации, с помощью которой на приемной стороне осуществляется синхронизация сигнала и оцениваются характеристики канала передачи. Пилотные несущие передаются на повышенном уровне мощности. В системе используются два типа пилотных несущих – повторяющиеся и рассеянные. Положение повторяющихся пилотных несущих в спектре сигнала не зависит от номера символа в кадре, а положение рассеянных – зависит. Фазы пилотных несущих могут принимать значения 0° или 180° в соответствии с опорной псевдослучайной двоичной последовательностью: 0 соответствует фазе 0° , 1 – фазе 180° . Инициализация ПСДП осуществляется в начале каждого символа OFDM. Мощность пилотных несущих составляет 16/9, тогда как средняя мощность информационных несущих и несущих ППС согласно коэффициенту нормирования равна 1.

Индексы рассеянных пилотных несущих определены в стандарте таблично. Если совместить центральные несущие при различных полосах радиоканала, то пилотные несущие более узкого радиоканала окажутся подмножеством пилотных несущих более широкого радиоканала. При полосе радиоканала 100 кГц используются 8 рассеянных пилотных несущих, 200 кГц – 22 несущие, 250 кГц – 28 несущих.

Таблица 4

Параметр	Значение		
Полоса радиоканала Δf , кГц	100	200	250
Число несущих K_{total}	215	439	553
Длительность полезной части символа T_U , мкс	2250		
Расстояние между соседними несущими $1/T_U$, Гц	$\frac{4000}{9} = 444 \frac{4}{9}$		
Расстояние между крайними несущими спектра $(K_{\text{total}}-1)T_U$, кГц (примерное значение)	95,1	194,7	245,3
Длительность защитного интервала T_G , мкс	281,25		
Длительность символа $T_S = T_U + T_G$, мкс	2531,25		

По маске пилотных несущих формируется 5 типов символов, которые последовательно повторяются (от нулевого до четвертого, начиная с начала кадра OFDM). Так как в кадре OFDM содержится 41 символ, то на границе кадра соседствуют два символа нулевого типа.

Индексы повторяющихся пилотных несущих тоже определены в стандарте таблично и так же, как и рассеянные пилотные несущие, повторяющиеся пилотные несущие более узкого радиоканала являются подмножеством пилотных несущих более широкого радиоканала. При полосе радиоканала 100 кГц используются 7 повторяющихся пилотных несущих, 200 кГц – 13 несущих, 250 кГц – 17 несущих. Повторяющиеся пилотные несущие расположены симметрично относительно центральной несущей канала. Кроме того, повторяющимися пилотными несущими являются центральная и крайние несущие для всех трех типов полос радиоканала (т.е. несущие с индексами 0, ± 107 , ± 219 , ± 276 относительно центральной несущей).

Несущие ППС. Несущие ППС предназначены для передачи параметров сигнала, связанных с режимом передачи. Информация ППС передается параллельно на четырех несущих. Каждая несущая ППС в одном и том же символе передает один и тот же дифференциально кодированный информационный бит. Индексы этих несущих относительно центральной несущей радиоканала равны ± 27 и ± 81 для всех вариантов ширины полосы радиоканала, т.е. все они расположены в пределах самой узкой (100 кГц) полосы канала.

Несущие ППС обеспечивают передачу номера версии системы (3 бита); типа модуляционного созвездия КОС (2 бита); скорости канального кодирования КОС (3 бита); числа кадров временного перемежения КОС (3 бита); индекса текущего кадра временного перемежения КОС (3 бита); битовых флагов наличия или отсутствия логических каналов НСК и НКД (2 бита); ширины полосы радиоканала (2 бита).

Инициализация фазы ППС-несущих осуществляется для каждого кадра OFDM. Для инициализации фазы ППС-несущих первого символа кадра используется та же опорная ПСДП, что и для пилотных несущих.

Блок данных ППС соответствует одному кадру OFDM и содержит 41 бит, которые определены следующим образом: 27 информационных битов (в текущей версии системы используются 18, остальные зарезервированы для дальнейших расширений); 14 избыточных битов для защиты от ошибок (сокращенный код БЧХ (41, 27, $t=2$)).

Несущие ППС передаются с уровнем мощности, равным 1, с использованием разностно-фазовой модуляции (DBPSK) и с инициализацией в начале каждого кадра OFDM.

Скорость полезного информационного потока. Скорость полезного битового потока различных логических каналов данных R_i (КОС, НСК, НКД) определяется по формуле

$$R_i = \frac{K_{inf i} n_{MOD} R_{FEC} R_{DF}}{T_U (1 + T_G / T_U)},$$

где $K_{inf i}$ – число информационных несущих логического канала i ; n_{MOD} – число битов информации, передаваемых на одной несущей; $R_{FEC} = K_{bch} / N_{ldpc}$ – скорость помехоустойчивого кодирования, равная отношению числа битов в КД к числу битов в ПКД; R_{DF} – доля полезной информации в КД, равная отношению числа битов пользовательских данных к общему размеру КД; T_U – длительность полезной части символа; T_G – длительность защитного интервала.

Заключение. Для реализации разработанной и стандартизированной системы РАВИС необходимо принятие быстрых и эффективных мер по проведению ОКР и созданию фрагментов сети вещания, а затем и полному внедрению системы.

Начало таким работам положено: Минпромторг России выделил на проведение ОКР «Разработка базовой технологии создания унифицированных модулей приемопередающей телекоммуникационной аппаратуры для обеспечения отечественной системы мобильного мультимедийного вещания РАВИС» (шифр «РАВИС») 166 млн руб. [34]. К сожалению, это как минимум в 10 раз меньше требуемого для проведения ОКР, организации производства аппаратуры и создания действующих систем мультимедийного вещания РАВИС.

В то же время следует отметить коммерческую привлекательность внедрения системы для промышленности и вещателей: по самым скромным подсчетам при реальном начале развертывания системы цена промышленной продукции и услуг, предоставляемых системой РАВИС к концу 2017 г., составит порядка 30 млрд руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкович А.В., Дворкович В.П., Зубарев Ю.Б и др. Способ трансляции информационного телевидения // Патент РФ № 2219676 от 08.11.2000.
2. Дворкович В.П., Дворкович А.В., Иртюга В.А. и др. Новая аудиовизуальная информационная система // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2005. – № 5. – С. 52–56.
3. ITU-R Document 6E/336-E, 6M/133-E. Russian Federation. Increase of the Band 8 (VHF) utilization efficiency. 3 March 2006.
4. ITU-R Document 6M/150-E. Russian Federation. Technical Report. Digital Mobile Narrowband Multimedia Broadcasting System AVIS. 14 August 2006.
5. ITU-R Document 6A/86-E, 6B/47-E. Russian Federation. Proposal of preliminary draft new Recommendation ITU-R BS.[XXXX] on service requirements for digital terrestrial sound and multimedia broadcasting in VHF band. Service requirements for digital terrestrial sound and multimedia broadcasting for mobile reception in VHF bands I and II. 8 October 2008.
6. ITU-R Document 6A/193-E. Russian Federation. Proposal on draft revision of Recommendation ITU-R BS.774-2. Service requirements for digital terrestrial sound and multimedia broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the VHF/UHF bands. 21 April 2009.
7. ITU-R Document 6A/226-E. Russian Federation. Proposal for a preliminary draft new Recommendation ITU-R BS.[MULT-FM]. Enhanced multimedia services for digital terrestrial broadcasting in VHF Bands I and II. 22 October 2009.
8. ITU-R Document 6A/345-E. Russian Federation. Proposal toward a draft new Recommendation ITU-R BS.[MULT-FM]. Enhanced multimedia services for digital terrestrial broadcasting in VHF Bands I and II. 14 April 2010.
9. ITU-R Document 6B/230-E. Russian Federation. Proposal toward a draft revision of Report ITU-R BT.2049-3. Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception. 14 October 2010.
10. ITU-R Document 6A/488-E. Russian Federation. Planning parameters for digital broadcasting system RAVIS. 28 April 2011.
11. Document FM45(09)135. Russian Federation. Digital terrestrial sound and multimedia broadcasting system RAVIS for Bands I and II. 27 November 2009.
12. Document FM(10)014. ECO. Result of public consultation on draft ECC Report 141 on Band II. Annex 1. Comment from Russia. 6 January 2010.
13. Document FM45(10)162. Russian Federation. Information for inclusion into draft revision of ECC Report 117. 26 March 2010.
14. Document FM45(10)171. Russian Federation. Technical Elements and Parameters for Digital Terrestrial Broadcasting System RAVIS in Band II. 26 March 2010.
15. Document FM45(10)194. Russian Federation. Proposals for Initial Draft Report on Possibilities for Future Delivery of Audio Broadcasting Services. 8 June 2010.
16. Document FM45(10)195. Russian Federation. Technical Elements and Parameters for Digital Terrestrial Broadcasting System RAVIS in Band II. 8 June 2010.
17. Document FM45(10)229. Russian Federation. Technical Elements and Parameters for Digital Terrestrial Broadcasting System RAVIS in Band II. 9 December 2010.
18. Document FM45(10)252. Russian Federation. Working Document on Draft Supplement to ECC Report 141. 15 April 2011.
19. ITU-R Report BT.2049-4. Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception. – ITU-R, 10/2010.
20. ITU-R Document 6/343-E. Working Party 6A. Draft new Report BS.[PLAN_PAR]. Planning parameters for terrestrial digital sound broadcasting systems in VHF bands. 17 May 2011.
21. ECC Report 117. Managing the transition to digital sound broadcasting in the frequency bands below 80 MHz. – ECC, 2010.
22. ECC Report 141. Future possibilities for the digitalization of Band II (87.5 – 108 MHz). – ECC, 2010.
23. ITU-R Document 6/282-E. Working Party 6A. Draft new Recommendation ITU-R BS [MULT-FM]. Requirements for enhanced multimedia services for digital terrestrial broadcasting in VHF Bands I and II. 26 October 2010.
24. Государственная комиссия по радиочастотам. Решение № 09-04-03 от 19.08.2009. Об организации опытных зон системы мобильного мультимедийного вещания в диапазоне 65,8–66,2 МГц.
25. Государственная комиссия по радиочастотам. Решение № 10-08-05 от 23.08.2010. О ходе выполнения решения ГКРЧ от 19 августа 2009 г. № 09-04-03 «Об организации опытных зон системы мобильного мультимедийного вещания в диапазоне 65,8–66,2 МГц».
26. ГОСТ Р 54309-2011. Аудиовизуальная информационная система реального времени (РАВИС). Процессы формирования кадровой структуры, канального кодирования и модуляции для системы цифрового наземного узкополосного радиовещания в ОВЧ-диапазоне. Технические условия.
27. Дворкович В., Дворкович А. Отвечает ли отечественная система РАВИС потребностям локального радиовещания. Ч. 1 // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2011. – № 2.
28. Дворкович В., Дворкович А. Отвечает ли отечественная система РАВИС потребностям локального радиовещания. Ч. 2 // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2011. – № 3.
29. ISO/IEC 14496-3 – Information Technology – Coding of Audio-Visual Objects. – Part 3: Audio. – ISO, 2009.
30. ISO/IEC 23003-1 – Information Technology – MPEG Audio Technologies – Part 1: MPEG Surround. – ISO, 2007.
31. ITU-T Recommendation H.264. Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services (ISO/IEC 14496-10. Information Technology – Coding of Audio-Visual Objects – Part 10: Advanced Video Coding). – ITU-T, 03/2009.
32. ISO/IEC 13818-1. Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information – Part 1: Systems. – ISO, 2007.
33. ETSI TS 102 606 V.1.1.1 (2007-10) Digital Video Broadcasting (DVB); Generic Stream Encapsulation (GSE) Protocol. – ETSI, 2007.
34. http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/order_lot_list_info/show?notificationId=242644.