УДК 621.396.93

ЦИФРОВОЕ ВЕЩАНИЕ ДО 30 МГЦ: ИЛЛЮЗИИ И РЕАЛЬНОСТЬ

Часть 1. Длинные и средние волны. Светлое время суток

Ю.А. Чернов, гл. научный сотрудник ФГУП НИИР, д.т.н.; chernov45@mail.ru

Радиовещание, как и все в мире, во власти «шагреневой кожи», за удовольствия надо платить.

Ключевые слова: Радиовещание на DRM, низкие и средние частоты, защитные отношения, замирания, сравнение систем, тесты.

Введение. Цифровое радиовещание (ЦРВ) в полосах до 30 МГц претендует на место в эфире. Главной побудительной причиной работ по цифровизации является реальность перехода от традиционного АМ-вещания (система с амплитудной модуляцией) на следующую более высокую технологическую ступень с надеждой на снижение энергопотребления системы, расширение и повышение качества предоставляемых услуг массовому радиослушателю. Предполагается, что при ЦРВ для обслуживания той же территории потребуется передатчик в 6-10 раз меньшей мощности, чем при АМ-вещании, зона обслуживания будет намного больше, а качество сигнала значительно выше. Кроме того, появится возможность передачи дополнительной информации. Наиболее же важным аргументом перехода на «цифру» является создание общего цифрового потока, способного в будущем обеспечить значительный рывок в массовом информационном обслуживании.

В настоящее же время эти возможные изменения к лучшему относятся к разряду ожидаемых, и часть проблем, относящихся к работе сети в целом, остается как бы за кадром. Поэтому многие начинания, связанные с подготовкой широкого внедрения ЦРВ в стандарте DRM (цифровое всемирное радио), имеют заметный налет эйфории. Чтобы некоторые из этих ожиданий не оказались напрасными и неизбежное изменение топологии сети не застало специалистов вещательных врасплох, представляется важным попытаться оценить, какие именно в приведенном выше перечне преимуществ действительно реальны, а какие – лишь приятные грезы. Начнем с более простого.

Дополнительная информация. Передача дополнительной информации в вещательном канале шириной 10 кГц

реальна и никогда не была принципиальной проблемой. Но вряд ли можно считать эту возможность прерогативой только ЦРВ. Для передачи дополнительной информации в обычных АМканалах разработано большое число систем как у нас в стране, так и за рубежом. Многие из систем опробованы и показали свою работоспособность. Однако эти системы не были внедрены. Причин здесь, как минимум, две: отсутствие подходящего парка приемников, и, видимо самое главное, для многомиллионной аудитории слушателей решение этой проблемы не актуально. Если бы этот вопрос стал чрезвычайно острым, то он в существенной части мог быть решен гораздо раньше и на уровне АМ-вещания [это же относится и к системе с одной боковой полосой (ОБП)1. В решении этой задачи у системы ЦРВ есть преимущество. Передача дополнительной информации может быть реализована в общем потоке и в большем объеме. Но проблемы, сдерживающие внедрение этой услуги, остаются теми же, что и для АМ-систем.

Излучаемая мощность, зона и качество. Эти три параметра цифрового вещания взаимосвязаны, поэтому рассматривать их приходится совместно, сравнивая с аналогичными параметрами для АМ-вещания. Границу зоны АМ-вещания в НЧ- и СЧ-диапазонах определяют заданным качеством приема в баллах по 5-балльной шкале. Практикой экспертиз установлено соответствие оценки в баллах определенному отношению сигнал/помеха (с/п) для разных условий приема и характера помех [1, 2]. Плавное изменение качества сигнала при изменении отношения с/п обусловливает возможность «задать» величину зоны вещания, соответствующую предъявляемым требованиям к качеству сигнала на ее границе. По общепринятым международным нормам граница зоны АМ-вещания определяется по медианному уровню напряженности поля E_{M} (или отношению

То, что для АМ-системы расчет ведется по медианной величине на-

пряженности поля полезного сигнала, не является сколько-нибудь существенным или смущающим обстоятельством, так как при случайных изменениях уровня сигнала и, следовательно, отношения с/п на некоторое время изменяется только субъективное качество приема программы. Почти за сто лет работы АМ-вещания стало очевидным, что радиослушатели практически не замечают непостоянства уровня сигналов на длинных и средних волнах в дневное время. Отсюда и бытовое представление о высоком постоянстве уровня сигнала на ДВ и СВ. Этому способствует также и система автоматической регулировки усиления, имеющаяся в АМ-приемниках. Случайные снижения полезного сигнала или изменения его уровня ото дня ко дню не приводят к тому, чтобы прием программы стал невозможен. Обычно ухудшение качества не превосходит 1 балла по 5-балльной шкале (это соответствует уменьшению уровня сигнала, примерно, на 10-11 дБ [1, 3]), и слушатель воспринимает эти явления как некоторое временное снижение комфортности при прослушивании перелачи.

У цифрового радиовещания такого критерия нет. Как и у любой пороговой системы, прием либо есть, либо отсутствует. Переход между этими состояниями занимает менее 0,5 дБ. В природе отношение с/п никогда не бывает строго постоянным. Поэтому для пороговых систем граница зоны вещания может характеризоваться только заданным процентом времени пропадания приема. Таким образом, АМ- и ЦРВ-системы не имеют общих критериев оценки качества сигнала и радиуса зоны вещания. В настоящее время не существует и способа объективного сравнения этих, по своей природе разных систем. Поэтому вопрос, что будет с зоной вещания, станет она больше или меньше, если заменить АМ-передатчик на цифровой той же средней (или пиковой) мощности, носит философский характер и в техническом аспекте ответа иметь не может. Любой вариант есть не что иное как сравнение несравнимых величин и может выбираться скорее всего голосованием экспертов без анализа мотивировок.

Базовые энергетические соотношения. Замена АМ-передатчика на цифровой той же мощности может быть произведена путем приравнивания либо пиковых мощностей $P_{\text{пик}}$, либо средних $P_{\rm cn}$. Последнее действие для целей планирования сети кажется более правильным, так как при этом примерно равны и потребляемые средние энергетические мощности $P_{\text{птр}}$ (при ЦРВ они несколько меньше) и их стоимости. Однако, если переход на цифровое вещание предусматривает использование существующих АМ-передатчиков при соответствующей их модернизации, то представляет интерес и сравнение зон покрытия при одинаковых пиковых мощностях.

Работа систем при одинаковой средней излучаемой мощности. В системе АМ-вещания следует ориентироваться на передатчики с динамически управляемой несущей (АМ с ДУН, или для краткости АМД) как на современные устройства, позволяющие сократить потребление электроэнергии примерно в два раза при той же информационной мощности [5]. Передатчики с обычной модуляцией уже сегодня представляют технику вчерашнего дня. На передатчике с номинальной мощностью P в режиме несущей без ДУН, с учетом того, что несущая с ДУН пропорциональна глубине модуляции, получим полную излучаемую мощность $P_{\text{изл}} = 1,5 Pm^2 \text{ кВт.}$ Если, в частности, m = 0.5, то средняя излучаемая мощность при ДУН составит 0.375P вместо $(1+0.5m^2)P=1.125P$ при обычной АМ. Информационная мощность не изменяется и составляет 0,125P; Радиус зоны обслуживания сохраняется, а общая излучаемая мощность снижается в три раза. На действующих передатчиках в силу ряда соображений вместо идеальной схемы используют ломаную характеристику ДУН [5], при этом экономия $P_{\text{птр}}$ несколько уменьшается, и поэтому для дальнейших расчетов примем для передатчиков с АМД уменьшение мощности в 2,8 раза.

При однополосной передаче (ОБП) практически вся излучаемая мощность является информационной. Мощность остаточной несущей (-12 дБ) составляет 6,25% от P. При модулирующем сигнале, эквивалентном сигналу при ДБП с m=0,5, информационная мощность (в одной боковой) составит 6,25% от P, а полная =0,125P. Если полную излучаемую мощность довести

до $P_{\text{изл}}=1,125P$, как в обычном АМ-передатчике с m=0,5, то это увеличение составит 1,125/0,125=9 раз. При этом зона покрытия (обслуживания) будет соответствовать увеличению информационной мощности с 0,125 (при АМ) до $0,0625 \cdot 9 = 0,5625P$, т. е. как при ДБП-передатчике (АМ с двойной боковой полосой) при увеличении его мощности в 4,5 раза. Если теперь проводить сравнение зон обслуживания АМ-передатчиков с цифровыми, принимая для первых в среднем m=0,5, то получаем следующие исходные соотношения:

а) двухполосный передатчик номинальной мощности P сравнивается с цифровым мощностью 1,125P (отношение информационных мощностей 0,125/1,125=0,111...);

б) двухполосный передатчик мощности P с АМД сравнивается с цифровым мощностью 1,125P. При этом для расчетов зон обслуживания при одинаковых средних мощностях P эквивалентного АМ-передатчика за счет экономии на несущей должна быть увеличена в 2,8 раза (отношение информационных мощностей при этом составит $0,125\cdot2,8/1,125=0,311...$);

в) однополосный АМ-передатчик мощностью 1,125Р и с информационной мощностью 0,5625P сравнивается с цифровым мощностью 1,125P (отношение информационных мощностей 0,5625/1,125=0,5). При таком сравнении выдерживаются одинаковые для всех видов работы стартовые условия — равенство средних излучаемых мощностей $P_{\rm cp}$. Полученные данные сведены в табл. 1. В ней же приведены и величины отношений с/ш (строка 2), равные защитным отношениям по ВЧ $A_{\rm вч}$ при $m \approx 50\%$ (такая величина моду-

ляции для АМ соответствует современной практике и принята при испытании цифровой системы DRM). Для помех в виде атмосферного шума МСЭ-R рекомендовало $A_{\rm BЧ}=30$ дБ при АМ (m=0,3) с хорошим качеством приема (принято для планирования), и 40 дБ для отличного качества [2, п. 1]. При m=0,5 (вместо 0,3) $A_{\rm BЧ}$ для АМ могут быть снижены на 4,4 дБ, т. е. будут составлять 25,6 дБ для хорошего качества приема и 35,6 дБ — для отличного. Условия работы DRM для идеального канала взяты из соответствующих документов МСЭ-R [6].

Работа систем при одинаковой пи-ковой мощности. При одинаковых пи-ковых мощностях излучаемого сигнала $P_{\text{пик}}$ путем аналогичных расчетов может быть получена табл. 2 ($P_{\text{пик}} = 4P$; пикфактор при цифровой модуляции принят, в соответствии с рекомендациями разработчиков DRM, 10 дБ).

Последние строчки табл. 1 и 2 показывают, что при равных излучаемых мощностях P (как средних, так и пиковых) в каналах с идеальными условиями для ЦРВ требуется значительно меньшая P, чем для АМ-вещания с ДБП. Однако по основным техническим показателям к ЦРВ приближается система с ОБП.

Сравнение зон в почти идеальных условиях (без медленных замираний). Будем опираться на защитные отношения по ВЧ $A_{\text{вч}}$ для системы DRM, приведенные в документах МСЭ-Р [6 (п. 3.4), 7], показанные в табл. 3, где номера каналов от 1 до 5 проставлены по степени ухудшения их параметров.

Каналы с 3 по 5 обладают многолучевостью и сопутствующими нежелательными особенностями, обусловленными реальной ионосферой.

Таблица 1

N	Параметр системы -	Значение параметра					
٠,٢		ДБП	АМ с ДУН	ОБП	DRM		
	Средняя информационная мощность относительно $P_{_{\rm cp}}$, разы	0,111	0,311	0,5	1		
2	Отношение с/ш по ВЧ при одинаковом стношении с/ш=24,4 дБ по НЧ (кроме DRM), дБ	30	25,5	23,5	Соответствует порогу приема 17 дБ		
3	отношение с/ш на НЧ-выходе детектора, дБ	24,4	28,9	33,9	-		
4	Допустимое снижение мощности, дБ, относительно АМ ДБП, у которой после детектора при m =0,5 с/ш=24,4 дБ	0	-4,5	-9,5	-13 (при пороге 17 дБ)		

^{1.} Величина с/ш по НЧ 24,4 дБ (строка 3) получена как 30-10+4,4, где 10 дБ - снижение уровня сигнала после детектора из-за 30%-ной звуковой модуляции; 4,4 дБ - добавка к НЧ-сигналу за счет увеличения модуляции с 0,3 до 0,5.

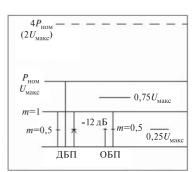
^{2.} Увеличение с/ш с 24,4 дБ до 28,9 дБ (строка 3) получено в соответствии с отношением информационных мощностей 0,311 к 0,111.

^{3.} Для ОБП отношение 33,9 дБ вместо 28,9 дБ (строка 3) получено добавлением 2 дБ (прирост мощности с 0,311 до 0,5) и 3 дБ за счет вдвое меньшей ширины полосы излучаемого сигнала.

^{4.} Для ЦРВ 13 дБ - разность между 30 дБ для АМ ДБП и 17 дБ (порог для ЦРВ).

Таблица 2

№	П	Значение параметра				
	Параметр системы		АМ с ДУН	ОБП	DRM	
1	Средняя информационная мощность относительно P_{\max} , принятой за единицу, разы	0,0313	0,0313	0,111	0,1	
2	$P_{\rm cp}$ относительно $P_{\scriptscriptstyle { m HOM}}$, разы	1,125	0,4 (1,125:2,8)	$0,888P = P_{\text{muk}}/4$	0,4 (0,1.4)	
3	$P_{\rm cp}$ относительно $P_{\rm pux}$, разы	0,281	0,1	0,222	0,1	
4	Отношение с/ш на выходе детектора, дБ	24,4	24,4	32,9	-	
5	Допустимое снижение $P_{\text{изз}}$, дБ, относительно АМ ДБП, у которой после детектора при m =0,5 c/ ш=24,4 дБ	0	0	-8,5	-8,5 (при по- роге 17 дБ)	



Относительная мощность 0.888 (к номинальной P) для ОБП (строка 2) в соответствии с пояснительным рисунком к табл. 2 получена следующим образом: максимальное напряжение выходного сигнала передатчика U при m=1 и остатке несущей (-12) дБ составит $0.75U_{\tiny{\text{макс}}}$. Чтобы использовать весь диапазон выходного напряжения передатчика до $2U_{\tiny{\text{макс}}}$ нужно увеличить P сигнала в ($2U_{\tiny{\text{макс}}}/0.75U_{\tiny{\text{макс}}}/2=7.11$ раз. Здесь $U_{\tiny{\text{макс}}}$ соответствует излучаемой мощности $P_{\tiny{\text{изл}}} = P_{\tiny{\text{ном}}} = P_{\tiny{\text{пом}}} = P_{\tiny$

Для ЦРВ при равенстве пиковых мощностей разность между информационными мощностями для ЦРВ и АМ-вещании с ДБП на 4,5 дБ меньше, чем при равенстве средних мощностей Р. Поэтому в табл. 2 в строке «Допустимое снижение мощности» в последней колонке вместо -13 дБ (в табл.1) стоит -(13–4,5)=-8,5 дБ.

Требующиеся для них $A_{_{\mathrm{BY}}}$ значительно превышают порог для идеального канала с 64QAM ($A_n = 17 \text{ дБ}$), и в среднем составляют 24 дБ, достигая в «трудных» каналах почти 30 дБ, что практически совпадает с защитными отношениями для АМ-системы с хорошим качеством. Далее будем ориентироваться на хорошее качество для АМ и базовую цифру $A_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} = 17$ дБ для идеального стабильного цифрового канала. Варианты работы при равенстве средних излучаемых мощностей могут быть проиллюстрированы на примере средневолновой подмосковной станции на частоте 846 кГц.

На рис. 1 показаны четыре зоны покрытия, рассчитанные в соответствии с защитными отношениями A, равными значениям с/ш, приведенными в табл. 1 в строке 2. Из рисунка видно, что зона 4 с цифровой модуляцией $(A_n=17д\text{Б})$ значительно шире зон с AM.

В случаях, когда каналы распространения радиоволн обладают многолучевостью, допплеровским смещением частоты и кратковременной нестабильностью уровня сигнала, для цифрового сигнала требуются более высокие защитные отношения $A_{_{\mathrm{R}^{\mathrm{J}}}}$. Они приведены в табл. 3 в строках 2-5, и для ДВ и СВ составляют 22 дБ, для KB — от 23 до 29 дБ. В Рек. BS.1615 для плохих условий распространения радиоволн приводится цифра 35 дБ. Если при построении рис. 1 для зоны ЦРВ применить защитное отношение 22 дБ (строка 2 в табл. 3), то граница зоны расположится практически там же, где и граница ОБП (зона № 3). При этом у ЦРВ перед двухполосной АМ еще сохраняются заметные преимущества.

В случае равенства пиковых мощностей передатчиков соотношения между радиусами зон покрытия пока-

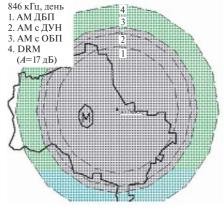
Таблица 3

№ -	Защитные отношения $A_{_{\mathrm{BY}}}$ для системы DRM при распространении							
канала	ионосферном, 64QAM СЧ, ВЧ	ионосферном, 16QAM СЧ, ВЧ	земном, 64QAM НЧ, СЧ					
1	17,6	12,8	16,7					
2	-	-	22,2					
3	25,9	21.9	-					
4	26,3	22,9	-					
5	29,1	22,6	-					

зано на рис. 2. Здесь для земной волны также применено более реальное защитное отношение 22 дБ, но с учетом равенства пиковых мощностей средняя и информационная мощность, как отмечено выше в табл. 2, снижается примерно на 4,5 дБ. При этом у зоны ЦРВ радиус будет такой же, как при защитном отношении 22+4,5 дБ. Он все равно больше, чем у АМ, но уже меньше, чем в предыдущем случае и совпадает не с зоной АМ ОБП на рис.1, а примерно с зоной АМ с ДУН (зона №2).

Сравнение зон в больших масштабах времени, в условиях реального радиовещания. Случайные изменения уровней сигналов в ДСВ-диапазоне реально намного больше, чем принято считать.

Эти изменения сложны по характеру, имеют случайную (ото дня ко дню) и детерминированную (сезонную) компоненты. Сезонные изменения также отличаются от года к году. Масштабы изменений зависят от рабочей частоты, протяженности и климатических характеристик трассы. Наблюдения в разных странах за многие годы показали, что в районах с теплым климатом, где средняя январская температура (северное полушарие) выше нуля, величины изменений напряженности поля в зоне вешания значительно меньше, чем в районах с жарким летом и морозной зимой. Например, для радиолиний средней протяженности (50-80 км) и частот 550-1000 кГц изменения размаха H(H,



Puc. 1



846 кГц, день

2. DRM (A=26,5 дБ

1. АМ ЛБП

дБ — разность между наибольшей среднемесячной медианой уровня сигнала в зимний период и наименьшей в летний) в зависимости от климатических условий приведены на рис. 3 [8, 9].

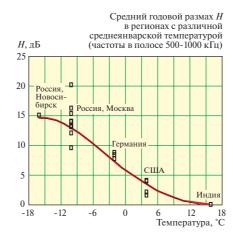
Так как первые обстоятельные измерения случайных и сезонных изменений напряженности поля в СВ-диапазоне были проведены в США, где из-за высоких зимних температур, как видно из рис.3, *H* невелик, то этот показатель, по-видимому, первоначально и послужил причиной считать средневолновые, а тем более длинноволновые сигналы для целей радиовещания практически стабильными.

Размах увеличивается с частотой, и в средних широтах России, где он выше, чем в США, на частотах более 1000 кГц может достигать 20 дБ. Если добавить к этому случайные изменения E ото дня ко дню, в среднем характеризующиеся логнормальным распределением со стандартным отклонением $\sigma_{.}=2\div 4$ дБ, то суммарная нестабильность сигналов в СВ-диапазоне становится серьезной преградой к обеспечению высокой надежности цифрового вещания. В длинноволновом диапазоне размах значительно меньше. В российских условиях на трассах до 100 км (по измерениям в Подмосковье) средний размах $H_{\rm cp}$ (от сезона к сезону) составляет приблизительно 3-4 дБ, а максимальный размах $H_{\scriptscriptstyle{\mathrm{MAKC}}}$ между лучшим зимним месяцем и худшим летним в восьмилетнем периоде измерений составил 6-8 дБ. Стандартное отклонение часовых медиан $E_{\cdot\cdot}$ ото дня ко дню σ_{π} на ДВ составляет в среднем 0,8 дБ.

В центральной Сибири размах на ДВ для трасс небольшой протяженности составляет 3–10 дБ [10, 11].

Не останавливаясь на деталях, рассмотрим с учетом статистических явлений несколько примеров. Вначале — для передатиков с одинаковыми средними мощностями. Примем, что помеха — постоянный атмосферный шум, что характерно для границы полезной зоны в сельской местности.

Для средневолнового диапазона величина $\sigma_{\rm д}$ достигает 4 дБ, поэтому для потерь времени приема, не превышающих 1, 2, 5, 10 или 30% необходимо обеспечить превышение медианы нестабильного сигнала над пороговым уровнем на величину $U(q) = \sigma_{\rm д} v(q)$, где q — процент времени превышения порога, v(q) — соответствующая квантиль. Для нормального распределения квантили имеют значения: $v(1) = 2,33; \ v(2) = 2,06; \ v(5) = 1,65; \ v(10) = 1,28; \ v(30) = 0,52.$ Соответственно запас на случайные из-



Puc. 3

менения уровня сигнала при σ_{π} =4 дБ составляет: $U(1)=4\times2,33=9,3$ дБ; U(2)=8,24 дБ; U(5)=6,6 дБ; U(10)=5,1дБ; U(30)=2,1 дБ. Для ЦРВ пороговое значение A_{\perp} на реальном канале на средних волнах равно примерно 22 дБ. Суммарное превышение над идеальными условиями с учетом порога 17 дБ для потери времени приема 1, 2, 5, 10 и 30% составит 14,3 (т.е. 22+9,3-17); 13,24; 11,6; 10,1 и 7,1 дБ соответственно. Из этого следует, что для ЦРВ долговременные защитные отношения $A_{\scriptscriptstyle \Pi\Pi}$ составят не 17 дБ, а 31,3; 30,24; 28,6; 27,1 и 24,1 дБ. Разность между этими новыми (долговременными) величинами защитных отношений и отношениями в системах AM (для которой A=30 дБ. табл. 1) и AM с ЛУН (A=25.5 дБ, табл. 1) ΔA при равных средних мощностях приведены в табл. 4.

В летний период излучаемая мощность должна быть увеличена для компенсации сезонного увеличения потерь на трассе. В двух последних строках табл. 4 приведены эти защитные отношения с учетом летних сезонов с сезонным размахом, принятым в качестве примера для территории России весьма

умеренным, равным 14 дБ. Для АМсистем учет сезонных изменений в Рекомендациях МСЭ-R не предусмотрен. Фактически это явление относится и к АМ-системе, но его влияние в основном вызывает снижение комфортности, не приводя к потери приема.

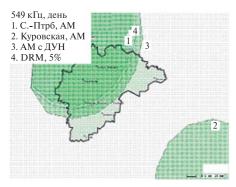
Из сравнения полученных результатов в данном разделе и в разделе для малых масштабов времени можно видеть, что при стабильных условиях защитные отношения для ЦРВ ниже, чем для АМ или АМД, а в расчете на долгосрочное вещание (в МСЭ-R длительность вещания рассматривается на годовом интервале) положение меняется на обратное. В соответствии с этим и зоны покрытия для стабильных условий выше при ЦРВ, а с учетом непостоянства сигнала становятся меньше, чем при АМ. Несколько лучшие результаты ожидаются на длинных волнах, так как в этом диапазоне СКО ото дня ко дню и сезонный размах ниже, чем на СВ. Но по существу соотношения не меняются.

Для иллюстрации полученных результатов сравним системы ЦРВ и АМ на примере вещания из С.-Петербурга на частоте 549 кГц при принятых выше условиях: $\sigma_{\rm a}$ =4 дБ, H=14 дБ, защитные отношения для АМ A=30 дБ, порог для ЦРВ $A_{\rm n}$ =22 дБ. На рис.4 показаны зимние (табл. 4, строка 1), а на рис. 5 летние (табл. 4, строка 3) зоны вещания для АМ и ЦРВ (для 5% потерь) при равных средних излучаемых мощностях.

Из рис. 4 и 5 можно видеть, что при долговременном вещании зоны при АМ с ДУН (тем более ОБП) имеют значительное преимущество перед работой в стандарте DRM, особенно в летние сезоны. Отметим, что методика планирования АМ-вещания в НЧ-, СЧ-полосах для дневного времени суток не предусматривает ни сезонных различий, ни изменений ото дня ко дню.

Таблица 4

3.6	Параметр	Разность между долговременными величинами защитных отношений и отношениями в системах AM						
№		AM	АМ с ДУН	ЦРВ, 1% потерь	ЦРВ, 2% потерь	ЦРВ, 5% потерь	ЦРВ, 10% потерь	ЦРВ, 30% потерь
1	Долговременные отно- сительные защитные отношения ΔA относи- тельно АМ, дБ, зима	0	-4,5	1,3	0,24	-1,4	-2,9	-5,9
2	ΔA относительно AM с ДУН, дБ, зима	4,5	0	5,8	4,74	3,1	1,6	-1,4
3	Годовые относит. защитн. отнош. ΔA относит. AM, дБ, для летних условий.	0	-4,5	15,3	14,24	12,6	11,1	8,1
4	ΔA относительно AM с ДУН, дБ, для летних условий.	4,5	0	19,8	18,74	17,1	15,6	12,6

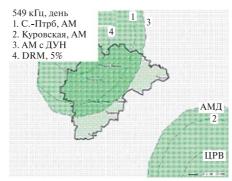


Puc. 4

Аналогичные расчеты для сравнения систем *при одинаковой пиковой мощности* передатчиков приводят к следующему.

Из табл. 1 и 2 (последние строки) следует, что с переходом от равенства средних мощностей к равенству пиковых для сохранения радиусов зон вещания преимущество у АМД перед АМ в 4,5 дБ упраздняется, а для ЦРВ сокращается с 13 дБ до 8,45 дБ. В этом случае долговременные защитные отношения для ЦРВ вместо 31,3; 28,6 и 24,1 (для 1, 5 и 10% потерь) становятся больше на 13-8,45=4,55 дБ, т.е. 35,85; 33,15 и 28,65 дБ. Это означает, что для ЦРВ положение становится еще хуже, и та зона, которая на рис.5 соответствовала 5% потерь времени приема (ЦРВ, 5%, зона №4), будет теперь иметь потери 10%. А новая зона с 5%-ными потерями будет еще меньше. Приведенные примеры допускают вариации входных параметров, например, можно в разумных пределах изменить величины отклонений уровня сигнала ото дня ко дню, или подкорректировать величины защитных отношений. Но на общей картине и проявившихся соотношениях это практически не отразится.

Глухие коридоры. Любая станция работает в окружении других станций. Между двумя близко расположенными станциями, если они работают в одном или соседних каналах на разных программах и мешают друг другу, образуется коридор, в котором взаимные помехи выше допустимых норм. Для АМ это зона плохого приема, но не его потери вообще. Для хорошего вещания эти условия не пригодны, но они и не препятствуют донесению информации в случаях, когда это крайне необходимо, или в чрезвычайных ситуациях. Кроме того, при АМ вокруг полезной зоны хорошего вещания постоянно существует периферийная зона с пониженным информационным качеством приема, но еще вполне приемлемым, размеры которой значительно превышают или



Puc. 5

сравнимы с основной зоной хорошего приема.

При цифровых сигналах положение хуже. При достижении между двумя зонами ЦРВ-станций значения порогового отношения с/п, например, 17 дБ, прием прекращается, и во всем образовавшемся коридоре не принимается ни одна из станций. Это глухой коридор. Периферийной зоны, аналогичной АМ-системе, при ЦРВ не существует. и это в некоторых случаях может иметь тяжелые последствия. При одновременной работе цифровых и АМ-станций потребуется снижение мощности ЦРВ-станций на 7 дБ, что в переходный период осложнит работу ЦРВ. Неизбежно потребуется дополнительный частотный ресурс и материальные ресурсы для установки маломощных заполняющих станций.

Иллюзии. Становится очевидным, что с учетом природных свойств сигнала поверхностной волны в климатических условиях средних широт возможность обеспечения ожидавшегося увеличения зоны обслуживания и уменьшения мощности передатчиков при ЦРВ (как это должно быть по Рек. BS.1615) в расчете на годовой цикл работы радиовещания на длинных и средних волнах (на ДВ несколько лучше) не следует из проведенных выше арифметических подсчетов. Для многих стран этот лозунг по существу не что иное, как клок сена перед уставшей лошадью.

Реальность, живые примеры. Для дальнейшего отметим, что МСЭ-R в Рек. BS.1615 для различных условий в СВ-полосе при использовании земной волны предлагает ориентироваться на величины минимальной напряженности поля, обеспечивающие ошибки декодирования не выше BER 1·10⁻⁴, приведенные в табл. 5 [7, табл. 4].

Для коротких волн эти цифры еще ниже. Низкие величины достаточной напряженности поля послужили отправной точкой для формирования мнения о фантастических экономических преимуществах ЦРВ перед аналоговой системой.

Мировой опыт дает возможность оценить реальность этих предположений. Обратимся вначале к данным в Интернете, в который радиослушателями из многих стран мира предоставлен огромный наблюдательный материал. Был выбран период 2007-2008гг. активного поступления данных на сайт «Live Broadcasts Schedule, International, National and Local DRM Broadcasts Underway in Markets Worldwide», где опубликованы данные о надежности приема (процент времени правильного приема за период прослушивания) и измеренного отношения с/п в разных регионах мира. Приведенные данные могли быть получены на профессиональном или близком к нему приемнике.

На рис. 6 показаны результаты приема в ДВ- и СВ- диапазонах. Почти все оценки относятся к коротким промежуткам времени, до нескольких минут или меньше. Некоторые измерения продолжались до 0.5 - 3 ч. Статистика отражает типовую ситуацию приема с реальным окружением. Из представленных данных следует, что высокая надежность в короткие интервалы времени (выше 98%), обеспечивается при отношении с/п выше 22 дБ, что не противоречит данным, приведенным в документах МСЭ-Р. При с/п=17 дБ надежность падает до 80%. Из всех сеансов приема бесперебойная работа в

Таблица 5

Схема	№ уровня защиты	Средняя скорость — кодирования	Минимальная величина напряженности поля, мкВ/м, при режиме устойчивости/типе занятости спектра			
модуляции			Α/0 (4,5 κΓц), Α/1 (5 κΓц)	Α/2 (9 κΓιι), Α/3 (10 κΓιι)		
16-QAM	0	0,5	33,3	33,1		
10-QAW	1	0,62	35,4	35,2		
	0	0,5	38,8	38,6		
64-QAM	1	0,6	40,3	39,8		
	2	0,71	42,0	41,6		
	3	0,78	43,7	43,2		

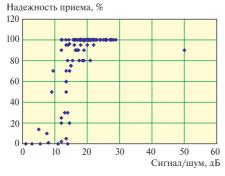
короткие интервалы времени наблюдалась в 64% случаев. Можно полагать, что при более продолжительных периодах приема число случаев с такой высокой надежностью сократится. При использовании бытовых приемников вместо профессиональных результаты будут значительно ниже.

К настоящему времени накоплен значительный опыт работы цифрового радиовещания на средних волнах. Результаты специальных экспериментов и статистика приема на профессиональный и обычный бытовой приемник получены в ряде стран.

В Испании [12, 13] (2004 г. и позже) эксперименты на частоте 1359 кГи в стационарных и мобильных условиях в городской, пригородной и сельской местности проводились с использованием профессионального приемника. Прием сигналов DRM проходит хорошо при напряженности поля выше 55 дБ. В стационарных условиях в тихой сельской местности без искусственных помех, многолучевости и доплеровского рассеяния 98% правильного приема в зависимости от формата сигнала (A/64/16/0.6/S, A/16/4/0.5/S) было возможно при напряженности поля не ниже 43-39 дБ, что только на 2-4 дБ выше, чем приведено в Рек. МСЭ-Р BS.1615 [13, п. 6.2]. В обычных условиях при наличии бытовых помех при мобильном приеме сигнала A/64/16/0.6/S частые сбои начинаются при снижении напряженности поля до 75-70 дБ,

Во Франции в 2002 г. эксперименты на частоте 1494 кГц в провинции (350 км от Парижа) показали [14], что при напряженности поля 60 дБ цифровой сигнал принимается как на высококачественный приемник, так и на менее качественный. При напряженности поля 51 дБ и ниже на штыревую антенну сигнал не принимается. Только на рамочную. В движении прием намного хуже, чем в стационарных условиях. При быстрой смене мест зачастую наблюдаются провалы до 20 дБ через интервалы пути порядка 100 м. Сделан вывод, что необходим более высокий уровень сигнала.

В Мексике в 2006 г. [15] проводились испытания системы DRM на частоте 1060 кГц с использованием профессионального приемника DT-700. Прием проводился в разных зонах, от городских, плотно застроенных, до сельских. Хороший прием (98% правильных фреймов) был возможен при напряженности поля выше примерно 80 дБ при отношении сигнал/шум более 20 дБ. Мобильный прием, так же как в Ис-



Puc. 6

пании и во Франции, проходил гораздо хуже. Для всех типов местности качество приема (% принятых фреймов) находилось в интервале от 70 до 97,8%. При этом напряженность поля составляла 80-95 дБ (см. рис. 7). На шкале справа показано наличие или отсутствие приема с 98%.

Во *Вьетнаме* в 2005 г. была проведена серия измерений Азиатско-Тихоокеанским радиовещательным союзом (ABU) [16]. Измерения сигнала DRM осуществлялись на частоте 729 кГц в двух направлениях — к югу и к северу от передатчика, установленного в Донг Хое.

В южном направлении использовался профессиональный приемник ICOM PCR 1000 RF с активной штыревой антенной. В северном — бытовой приемник со штатной автомобильной антенной. На профессиональном приемнике прием был возможен в стационарных пунктах на расстоянии до 120 км при напряженности поля на границе зоны 57 дБ. В северном направлении прием на бытовом приемнике продолжался только до расстояния 65 км, что практически в два раза меньше, чем на профессиональном приемнике.

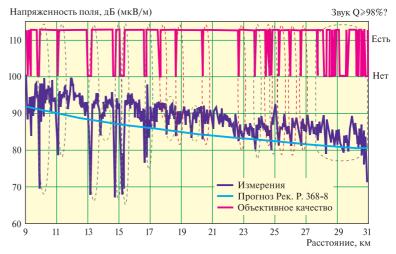
В Италии в 2006 г. были проведены наиболее, на наш взгляд, показа-

тельные испытания по приему сигнала DRM [17]. Передатчик в Милане работал на частоте 693 кГц. Прием и контроль велся во многих стационарных пунктах (около 150) на рамочную антенну. Одной из задач было исследование размера и конфигурации зоны приема при использовании профессионального и бытового приемников. Результаты показали, что только в 38% мест измерений был возможен прием на бытовой приемник, где напряженность поля не ниже примерно 58 дБ, в то время как на профессиональный приемник прием был везде. Были выявлены области, где профессиональный приемник хорошо работает при 43 дБ, по аналогии с результатами измерений в Испании [13].

В целом различие в зонах приема на эти два типа приемников представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что площадь зоны приема на бытовой приемник более чем в три раза меньше, чем на профессиональный. Средние радиусы зон отличаются практически в 1,5—2 раза, что похоже на результаты, полученные во Вьетнаме.

В Англии [18] в 2007–2008 гг. проводились измерения цифровых сигналов на частоте 855 кГц с использованием профессиональных приемников с рамочной антенной в радиусе до 30 км от места передачи (г. Плимут). Результаты малопоказательны, так как в пунктах измерений (всего 5) напряженность поля и зимой и летом была всегда высокой (60–85 дБ), и прием в дневное время проходил без сбоев.

В *Индии* [19] проводилось тестирование систем simulcast (AM и DRM в одном канале), NVIS (вертикальное излучение) и передачи в канале шириной 18 кГц. Измерения осуществлялись на небольших расстояниях от передатчи-



Puc. 7

ка при высокой напряженности поля (выше 72 дБ). Прием на коммерческие приемники был почти всегда хорошим. Только в некоторых местах надежность приема находилась в пределах 88–96%.

Вместе с тем в режиме simulcast субъективные оценки показали, что в условиях эксперимента цифровой режим обеспечивал большую зону покрытия, чем при аналоговом режиме (критерии субъективных оценок не сообщаются).

В *Бразилии* [20] тесты показали прием без сбоев при напряженности поля выше 65 дБ при стационарном приеме для модуляции 16QAM и выше 80 дБ для 64QAM. Использовался профессиональный приемник AOR7030. В следующей более широкой серии измерений также было подтверждено, что необходим уровень сигнала 65—80 дБ в зависимости от вида модуляции и времени суток (ночью уровень помех выше).

Некоторые итоги для светлого времени суток. Подводя итоги по приему цифрового вещания на ДСВ, первое, что необходимо отметить, это совпадение теоретических оценок, проведенных на статистической основе, и практических результатов. Как видно, пока результаты неутешительные. В среднем в реальных условиях требуются значительно более высокие напряженности поля чем продекларировано в Рек. BS.1615. Только в редких идеальных условиях реальные результаты превышают значения, приведенные в Рекомендации, на 2-4 дБ. Второе, что обращает на себя внимание, большой разброс полученных результатов. Скорее всего, он может быть следствием различий в окружающей обстановке в разных странах, но это жизненные условия, и с ними необходимо считаться. В любом случае практические результаты не позволяют однозначно определить рецепты планирования в удобных узких рамках.

По приведенным экспериментальным данным для приема DRM в CBдиапазоне с надежностью 98% даже в стационарных условиях на короткие промежутки времени в ряде случаев требуется напряженность поля более высокая, чем для аналогового вещания. Вместо примерно 60 дБ для хорошего или отличного качества при двухполосной АМ-системе (кроме больших городов) в тех же условиях для цифры требуется (по результатам измерений в разных странах и в разных условиях) 45-70 дБ и более. Это для профессионального приемника. Для бытового приемника, как следует из результатов



- Область, где сигнал может приниматься на профессиональный приемник
- Области, где сигнал может приниматься также и на коммерческие приемники

Puc. 8

измерений, в частности, во Вьетнаме и Италии, требуется медианная напряженность поля $E_{_{\rm M}}$ более высокая, примерно на 10-13 дБ, т. е. не менее 55-80 дБ. Это формально собранные независимые данные, разбросанные по миру. Они представлены в табл. 6.

Из предпоследней колонки видно, что при любых условиях приема (на разных территориях) требуется минимальная напряженность поля не ниже, а иногда и выше, чем для приема аналоговых сигналов. Учитывая, что такие условия приема на грани срыва, для постоянного приема, особенно для приема на носимые приемники с короткими штыревыми антеннами, необходимы дополнительные запасы мощности на изменения уровня сигналов ото дня ко дню и от сезона к сезону в расчете на многолетнюю работу сети. В начале статьи было отмечено, и тоже с учетом экспериментальных данных, что к цифрам табл.6 для континентальных условий в средних широтах необходимо добавить еще 15—20 дБ на сезонные изменения.

Для более теплых регионов Мира — меньше или, как в Индии и странах, аналогично расположенных по широте, такого добавления вообще не требуется. Необходимо отметить, что в странах низких широт (Бразилия, Мексика, Индия, Вьетнам) обычно уровень атмосферных помех повышен, поэтому при отсутствии искусственных помех в какой-то мере это может сказываться и на требованиях к минимальной напряженности поля.

Прием в движущемся дилижансе, как отмечено во всех измерениях, также требует более высокого уровня сигнала, в зависимости от местных условий, на 10-20 дБ. Это учтено в табл. 6. Добавим, что при вещании на большую территорию существует еще местностное распределение, по сути аналогичное изменениям в движении, но меньшее по необходимому запасу. И хотя в итоге определенную цифру называть преждевременно, бесспорно, что для гарантированного приема DRM с надежностью 98%, судя по зарубежным данным, потребуется напряженность поля, значительно превышающая величину, достаточную для хорошей и отличной работы аналоговой системы. Может быть в перспективе, если для DRM удастся несколько снизить пикфактор, положение DRM укрепится. Но вряд ли существенно.

В последних разделах сравнение проводилось с двухполосной АМ-системой с минимальным уровнем сигнала примерно 60 дБ. Если сравнить с АМ с ДУН или с однополосной системой, которые намного более экономичны,

Таблица 6

	Место приема	Минимальная напряженность поля $E_{_{\mathrm{M}}}$, дБ, достаточная для приема сигнала DRM в реальных условиях						
№		Идеальные условия, про- фессиональный приемник	Стационарный прием, профессиональный приемник	Прием в движе- нии, профес- сиональный приемник	Стационар- ный прием, бытовой приемник	Прием в движении, бытовой при- емник		
1	Испания	39-45	55	_	(≈ 65)	(≈ 80)		
2	Франция	45 на рамку*	51	70**	(» 60)	(≈ 80)		
3	Мексика	-	80	80 +(≈ 15)	(≈ 95)	(≈ 110)		
4	Вьетнам	-	57	(≈ 67)	≥ 70	(≥ 85)		
5	Италия	43	-	-	≥ 58	(≥ 73)		
6	Англия	≥ 60*** H	а рамку	_	-	_		
7	Индия	_	_	_	≥ 72***	-		
8	Бразилия	-	65-80	_	≈(75–90)	_		

^{*} На штыревую антенну прием идет не на каждый профессиональный приемник.

^{**} Сообщается, что при движении провалы часто достигают 20 дБ.

^{***} При меньшем уровне сигнала данные не приведены (или измерения не проводились).

В таблице в скобках проставлены величины, полученные путем добавления разницы между минимальным уровнем сигнала профессионального приемника и бытового -10 дБ, и между стационарным приемом и мобильным -15 дБ, что следует из опытных данных.

то энергетические различия систем увеличатся еще в разы.

Приведенный выше анализ работы цифровой системы естественно вызывает вопрос об учете статистики для аналоговой системы. Сложность ответа, как отмечено в начале, предопределена несопоставимостью систем из-за различий применяемых к ним критериев. Для АМ в соответствии с Актами Конференции от 1975 г. статистические изменения не учитываются. Поэтому реальный уровень качества для таких систем плавающий. Но система работает, так как реальные изменения уровня сигнала практически не приводят к пропаданию приема.

Для аналоговых систем это уже «прижилось» и стало нормой. Если ограничить полезную зону при АМ только отличным качеством при всех ситуациях, то в таком варианте зона с отличной оценкой несколько сократится, но периферийная часть с хорошим и удовлетворительным качеством, не существующая при DRM, может стать больше основной, и при сравнении повисает в воздухе. Нет аналога. Сравнивать два таких разнородных варианта с единой технической позиции пока не представляется возможным.

Заключение. Среди группы аналоговых систем, с которыми сравнивалась цифровая система, бесспорное лидерство за системой с ОБП. Все преимущества, которые были представлены для системы АМ с динамическим управлением несущей, должны быть усилены примерно на 8 дБ при ее замене на систему с ОБП. Из сопоставления результатов теоретического анализа с учетом случайных изменений с международными данными натурных тестов видно их хорошее совпадение.

Наиболее значимый вывод состоит в том, что условия распространения волн в реальной среде во всей полноте не могут быть смоделированы и воспроизведены в лаборатории. В жизни действует большое количество не учтенных в теории факторов. Их влияние на работу

цифровых систем при статистических изменениях сигналов по сравнению с расчетами по аналоговой модели может потребовать многократного увеличения излучаемой мощности. Особенно при сравнении с системой с ОБП. Удивительно, что за 11 лет жизни DRM не появилось ни одного основательного аналитического исследования его длительной работы при низкой и высокой напряженности поля ни в одном диапазоне, ни в одной стране. Есть достаточно краткий обзор результатов непродолжительного тестирования в части стран, рассмотренных выше [21]. Результаты приводятся примерно те же.

Окраска выводов кажется оптимистичной. Но без статистического анализа и учета случайных и сезонных изменений ее нельзя признать достаточно обоснованной. Особенно следует подчеркнуть, что для территорий, расположенных в средних широтах с континентальным климатом, где находится и наша страна, исследований, подобных зарубежным, не проводилось, а они крайне необходимы для определения места ЦРВ в общей системе вещания.

С учетом зависимости уровня сигнала земной волны от геофизических и климатических условий, доступно обрисованных в [22], сказать однозначно, что использование ЦРВ везде в мире будет выгодно, пока нельзя.

Работа цифровой системы может быть в одних частях мира оправданной, в других — мало эффективной, поэтому в каждом крупном географическом районе требуется проведение специальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- MC9-R, Pek. BS.560-4. Radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting.
- Чернов Ю.А., Никонов А.В. Защитные отношения в совмещенном канале для АМ радиовещания// Электросвязь. – 1992. – № 9. – С. 21–23.
- 3. Акопова Т.К., Булатова Н.Н., Чернов Ю.А. Увеличение напряженности поля в ВЧ канале радиовещания, не-

- обходимое для перехода от удовлетворительного качества приема к хорошему/ Труды НИИР. 1987. № 2. С. 18—20.
- Локшин М.Г., Шур А.А., Кокорев А.В., Краснощеков Р.А. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания. Справочник. — М.: «Радио и связь», 1988.
- Гамаюнов Е.М., Городецкий С.Э., Козыровский Б.Ю., Чернов Ю.А. и др. Экспериментальная оценка влияния динамического управления несущей на отношение сигнал/шум в АМ радиовещании// «Электросвязь». 2001. № 8. С. 31—35.
- 6. МСЭ-R, Док.6-6/6, 2000.
- 7. MCЭ-R, Рек. BS.1615.
- Чернов Ю.А. Сезонные изменения напряженности поля земной волны в дневное время в НЧ, СЧ диапазонах// Труды НИИР. 2005. № 9. С. 109–115.
- 9. МСЭ-R, Рек. Р.1321.
- 10. Захаренко В.Н. Влияние вариаций электропроводности подстилающей поверхности на амплитуду напряженности земной волны диапазонов СВ и ДВ// Электросвязь. 1992. № 1. С. 34—35.
- Захаренко В.Н., Коржинская С.В., Огурцов Б.Л., Попов Л.Н. Влияние сезонных изменений параметров подстилающей поверхности на величину радиополя// Сб. Низкочастотный волновод «Земля ионосфера». 1990. С. 74–77.
- 12. МСЭ-R, Док. 3J/25, 2008 г., Испания.
- 13. МСЭ-R, Док 6Е/175, 2005 г., Испания.
- 14. МСЭ-R, Док. 6Е-54, 2004 г., Франция.
- 15. МСЭ-R, Док.6Е-403, 2006 г., Мексика.
- 16. МСЭ-R, Док.6Е-390, 2006 г., ABU, (Вьетнам).
- 17. МСЭ-R, Док. 6/353, 2007 г., Италия.
- 18. **Murphy A.** The Plymouth Digital Radio Mondiale (Drm) Trial Long-term Reception Results// Research White Paper WHP 174, 2009, BBC.
- 19. МСЭ-R, Док. 6А-10, 2008 г., Индия.
- 20. МСЭ-R, Док. 3J-140, 2010г., Бразилия.
- 21. МСЭ-R, SG06- Doc. 6/142, 5 May 2009 г.
- 22. **Чернов Ю.А.** Где DRM'у жить хорошо// «ИКС». 2010. №3. С. 58—61.

Получено 26.07.11 Продолжение см. ЭС №2