УДК 621.396.93

ЦИФРОВОЕ РАДИОВЕЩАНИЕ ДО 30 МГц: ИЛЛЮЗИИ И РЕАЛЬНОСТЬ*

Часть 3. Короткие волны

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

Ключевые слова: *системы радиовещания, цифровой сигнал, помехи, полезные зоны, сравнительные результаты.*

Введение. Цифровое радиовещание (ЦРВ) задумывалось как средство для спасения КВ-вещания, которое сильно проигрывало по качеству приема перед УКВ-вещанием и другими высококачественными системами. Основными недостатками КВ-сигнала считались замирания всего сигнала (плоский фединг) и селективные замирания. В структуре цифрового сигнала были приняты необходимые меры защиты (временное и частотное перемежение), которые в некоторой мере улучшали надежность приема (для ЦРВ принято достаточным сохранение 98% переданных фреймов). Воздействие ионосферы на цифровой КВ-сигнал радикально отличается от ее влияния на сигналы в СВ и ДВ диапазонах. Поэтому кратко рассмотрим особенности ионосферного канала.

Основные свойства КВ-канала, важные для ЦРВ. Почти за 100 лет изучения КВ-канала, преимущественно на узкополосных сигналах, выработалось представление о характере и законе распределения замираний. Для быстрых замираний на интервалах локальной стационарности условились считать, что замирания следуют закону Релея, в первую очередь потому, что теоретически к нему приводит простейшая модель многолучевости. Однако на практике различные авторы получили более десяти видов распределений, из которых лишь 10-30% были оценены как близкие к релеевскому [1]. В частности, в [2] представлены результаты сравнения эмпирических данных с распределением Релея и логнормальным законом, между которыми расположен основной массив измеренных значений. На низких уровнях сигнала ярко выражена тенденция приближения к логнормальному закону. Причинами могут быть: фон атмосферного шума и присутствующие на низком уровне боковые полосы модуляции. Поэтому многочисленные частные результаты, замусоренные слабыми побочными сигналами, порождают весьма причудливые виды распределений. В некоторых случаях сказываются и непосредственно ионосферные воздействия.

Для цифрового сигнала распределение формируется по-другому. Не вдаваясь в детали, отметим, что во многих публикациях указывается на меньшую дисперсию быстрых замираний цифрового сигнала, на что есть чисто физические причины. Медленные замирания, под которыми разумеются изменения уровней часовых медиан от часа к часу или ото дня ко дню для определенного часа суток, для аналоговых и цифровых сигналов вполне удовлетворительно описываются логнормальным распределением.

Помехи в КВ-канале представляют смесь атмосферного шума, промышленных, бытовых помех и помех от других станций. МСЭ-R обладает картами атмосферных помех по всему миру, хотя для территории России они не точны по причине недостаточного объема привлеченных данных. Средние величины помех находятся в большом диапазоне значений в зависимости от территории, времени и частоты. Из карт также видно, что в заданных конкретных условиях могут быть отличия от среднего значения до 10 и более децибел.

Наиболее существенные помехи создаются радиостанциями, работающими в том же канале или на частотах, на ±5 или 10 кГц отличающихся от центральной частоты. Уровни помех весьма различны, хорошо прогнозировать их не удается, поэтому приготовиться к их воздействию и принять защитные меры практически невозможно. Последнее, что следует отметить, это явление, которое можно назвать саморазрушение сигнала.Наблюдения показали, что при высоком уровне сигнала и отсутствии помех неожиданно происходят провалы в приеме цифрового сигнала на несколько секунд. Казалось бы без причин. Не вдаваясь в подробности весьма специфического вопроса, отметим, что так называемый «луч», условно обозначающий траекторию движения радиоволны, десятилетия служивший удобным понятием для оценочных энергетических расчетов и расчетов протяженности «скачка», в применении к распространению цифрового сигнала через ионосферу должен быть заменен на реальную усложненную эластичную пространственную структуру. Внутри нее даже при одном луче происходят свои динамичные процессы с эпизодически повторяющимися резкими ослаблениями сигнала в точке приема. При аналоговом сигнале подобное явление внимания не привлекало.

Минимальная достаточная напряженность поля на КВ. Для аналогового вещания удовлетворительного качества МСЭ-R рекомендует ориентироваться на минимальную напряженность поля $E_{мин}$ (в документах МСЭ-R это называется чувствительностью приемника), равную 40 дБ/мкВ/м [3] (далее везде /мкВ/м будем опускать). Для приема цифрового радиовещания – это $E_{мин}$, обеспечивающая исправное декодирование цифрового сигнала. Но здесь существует целый ряд оговорок: при каких условиях и какая величина является достаточной. Необходимые подробности содержатся в Рек. BS.1615 [4], где в табл. 6 приводится величина требующейся на коротких волнах $E_{мин}$ (примерно 25 дБ при модуляции 16QAM, и 30 дБ при 64QAM). Чувствительность бытового приемника зависит от многих факторов и, в первую очередь, от типа антенной системы. Для КВ во всех приемниках устанавливается электрическая антенна. Магнитная антенна на КВ в связи с низкой эффективностью при малых размерах не применяется. Внутренние шумы, как правило, играют второстепенную роль. На прием КВ-передач существенно влияет географическое положение КВ-канала. В северных широтах, выше примерно 60-й параллели, в ионосфере часто наблюдаются магнитные и ионосферные возмущения или бури, при которых поглощение КВ-сигналов настолько велико, что приема не бывает часами и днями.

Результаты приема цифрового радиовещания. Ранние попытки зарубежных специалистов(2003–2004 гг.) принять сигналы ЦРВ на трассах протяженностью более 8000 км на частотах 12 и 21 МГц при излучаемой мощности 40 и 100 кВт

* Начало см. ЭС, 2012, № 1, 2.

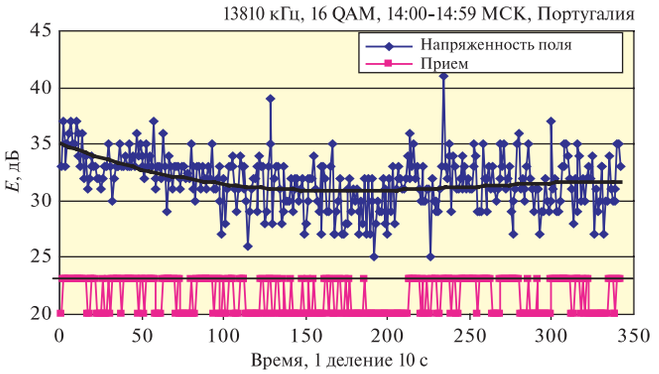

Рис. 1

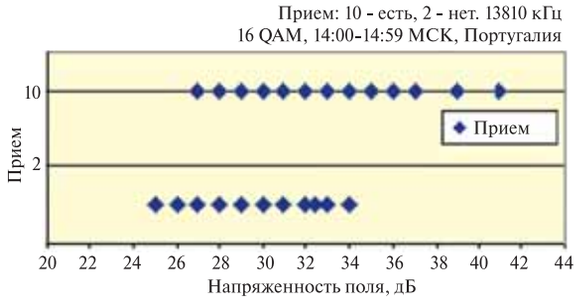

Рис. 2

не дали положительных результатов [5]. Авторы отмечают, что основная причина неудач – низкий уровень сигналов. В России измерения на трассах протяженностью от 1000 до 4000 км проводились в 2008 г. и с марта 2011 до марта 2012 гг. (работу с зенитным излучением здесь не рассматриваем). Прием цифровых сигналов при замираниях сигнала характеризуется наличием провалов приема в течение от 1 с до минут. Их частота и продолжительность зависят от отношения С/П и его изменения во времени. Типичный пример поведения сигнала на протяженной трассе на частоте 13810 кГц при модуляции 16QAM приведен на рис. 1 (август 2008 г.). Внизу показано наличие и отсутствие приема. Прием проходил в дачной местности вне помещения. Средняя *E* в течение часа изменяется в пределах 30–35 дБ, что выше минимальной по [4] на 5–10 дБ. Напряженность поля во всех случаях измерялась компаратором FSM-11 на рамочную антенну. Текущие флуктуации сигнала вызывают частые пропадания сигнала, что в целом делает прием программы невозможным. Зависимость наличия или отсутствия приема (условно числа 10 и 2) от *E* для данного примера приведена на рис. 2. Рисунок хорошо отражает важную особенность: наличие переходной зоны между уровнем сигнала, при котором возможно начало приема (на рис. – 27 дБ), и наибольшим уровнем сигнала, при котором приема может не быть (34 дБ). Ширина переходной зоны в разных случаях не является постоянной, изменяясь примерно от 5 до 18 дБ. Наличие переходной зоны наблюдалось на всех трассах.

Эта особенность свидетельствует о том, что в рассмотренном случае стабильный прием возможен при *E* выше 34 дБ. С учетом статистических изменений сигнала от часа к часу $E_{ср}$ должна быть повышена на величину, соответствующую обеспечению заданной надежности (для радиовещания принято 98%). При нормальном распределении (для цифрового сигнала) 98%-я квантиль равна 2,06, и при стандартном отклонении для медленных замираний вниз 6,25 дБ [6, табл. 2] получим добавочный уровень 6,25×2,06≈12,9 дБ. В итоге для данного часа получим необходимое $E_{мин}$=34+12,9≈47 дБ вместо 25 дБ (по Рек. BS.1615). Это для практически идеальных условий приема. В менее тихих местах или в городе потребуется более высокая напряженность поля. Данный расчет весьма упрощен, но дает представление о масштабах явления.

При измерениях с марта 2011 г. по февраль 2012 г. прием проводился вблизи Москвы в дачной местности без промышленных объектов, на краю лесной зоны в типичных бытовых условиях на первом этаже в деревянном помещении. Для контроля использовались два одновременно работающих приемника «Орленок» со своими штатными электрическими антеннами (штырь 35 см) или с придающейся в комплекте проволочной антенной длиной ≈ 4 м. Чувствительность приемника по напряженности поля со штатной антенной при приеме аналоговых станций на КВ, как было измерено, не хуже, чем у FSM-11. Для наблюдений были отобраны

Частота, кГц	Страна передачи	*P*, кВт	Параметры модуляции: основной канал/служебный	Длина трассы, км	$E_{мин}$ по Рек. BS.1615, дБ	Наблюдаемая $E_{мин}$, дБ	Необходимая $E_{мин}$, дБ
3955	Англия	100	64/16QAM	2800	30	46	60
3975	Англия	100	16/16QAM	2800	30	-	-
6135	Англия	100	16/4QAM	2800	30	-	-
6175	Румыния	90	64/16QAM	1500	30	57	66
7245	Румыния	90	64/16QAM	1500	30	53	74
7340	Краснодар	100	16/4QAM	1200	25	52	58
7390	Румыния	90	64/16QAM	1500	30	45	64
9780	Испания	100	64/16QAM	3500	30	39	58
9950	Индия	50	64/16QAM	4400	30	48	57
			16/4QAM	4400	25	40	54
11615	Румыния	90	64/16QAM	1500	30	48	51
11925	Португалия	90	64/16QAM	3900	30	39	43
11995	Португалия	90	16/4QAM	3900	25	37	42
15190	Ватикан	125	64/16QAM	2400	30	-	-
				Для режима 16QAM		Мин. 37	Макс. 58
				Для режима 64QAM		Мин. 39	Макс. 74
13810	Португалия 2008 г.	90	16/4QAM	3900	25	27	34

станции с $E_{ср}$ не ниже 30 дБ. Перечень наиболее часто принимавшихся станций приведен в таблице. Необходимая $E_{мин}$ соответствует стабильной работе в течение всех сеансов измерений (допускались редкие пропадания приема на 1–2 сек.).

В таблице в двух последних колонках приведены значения *E*, определяющие переходную зону: минимальную величину сигнала, при которой сигнал был принят, и максимальную величину, при которой приема еще не было. Эти цифры получены при реальной помеховой обстановке. Можно видеть, что для стабильного приема данного набора станций при модуляции 64QAM требуется *E* не менее 43 дБ и до 70 дБ. При модуляции 16QAM может быть допущен несколько меньший уровень сигнала, в проведенных измерениях от 42 до 58 дБ. Во всех случаях для приема в реальных условиях требуется превышение *E* над рекомендованным в Рек. BS.1615 значением примерно на 15 дБ и более.

Надежность приема оценивалась по следующей шкале. Прием без сбоев или с перерывами (редкими и не долее 1 с) – отлично, или 10. Прием с провалами (продолжительными и частыми) – 6. Прием редкими фрагментами – 4. Отсутствие приема или короткие «вспышки» – 2. Кроме первой позиции все другие (с провалами приема) для использования в качестве радиовещания непригодны. Пример относительно хорошего приема румынской станции в вечернее время на протяжении летнего периода (с апреля по октябрь 2011 г.) приведен на рис. 3. Прием велся на штатную антенну. Из рисунка видно, что за весь период наблюдений только в единичные дни прием был плохим. В основном это совпадало с периодами, когда *E* опускалась ниже 50 дБ. Уже на этом рисунке видны характерные особенности приема на КВ: большой размах напряженности поля, диапазон изменений составляет 35–75 дБ, и снижение *E* в середине лета. Прием хорошо проходит почти во всех случаях при *E* выше 50 дБ, что примерно на 20 дБ выше, чем продекларировано в Рек. BS.1615. Несколько хуже прием этой же станции проходит в утренние часы на частоте 7390 кГц, хотя $E_{ср}$ выше 55 дБ, что превышает более чем на 25 дБ величину, рекомендованную МСЭ-R.

В процессе измерений хорошо проявилась еще одна особенность работы цифровой системы на многомесячном интервале времени. Периоды хорошего приема (до двух недель) сменяются плохими периодами (примерно неделя), что можно связать со спадами уровня сигнала ниже 40 дБ в дни плохого приема. Такие периодические смены поведения радиолинии, работающей много месяцев, характерны для всех тестированных трасс. Это подтверждает ранее высказанную мысль, что тестирование в течение одной - двух недель не может правильно отразить ситуацию на длительном периоде работы.

Прием цифровых сигналов, как выяснилось, очень чувствителен к окружающей обстановке, в которой он происходит. Измерения проводились в различных условиях, часть вне здания, часть – внутри, в окружении обычного набора бытовых электроприборов, часть – с выключенными наиболее шумными устройствами. Основными деструктивными элементами являются: компьютер, некоторые источники питания, холодные (энергосберегающие) лампы, конфигурация электропроводки и ее задействованной «горячей» части. По предварительным данным, на имеющемся объеме наблюдений работающий компьютер вызывает сбои приема при *E*, начиная с 60 дБ и ниже, на расстояниях до приемника менее 1,5 м. Энергосберегающие лампы не мешают приему, если они расположены не ближе 3 м и имеют мощность не выше 20 Вт. В частности, лампа мощностью 11 Вт вызывает

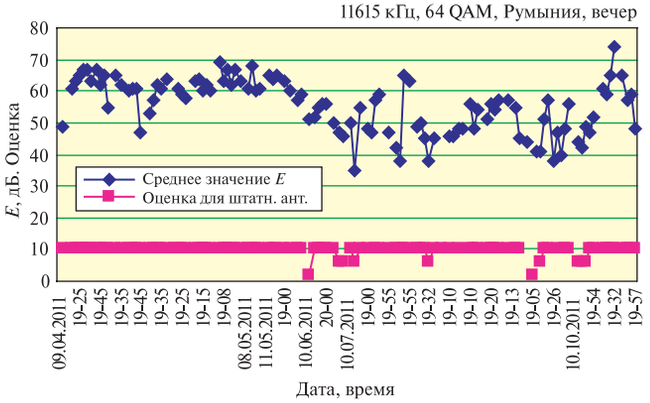

Рис. 3

сбои приема уже на расстоянии 1 м при *E* от 50 дБ и ниже. Однако, в отличие от компьютера, влияние ламп не всегда одинаково: при одинаковых внешних условиях может проявляться, а может и не мешать. Влияет наличие или отсутствие других помех. Приемник может реагировать также на включение и выключение обычных ламп накаливания комнатного освещения. Сказывается изменение конфигурации электропроводки и ее активной части, определяющей импеданс окружающей среды и локальную конфигурацию принимаемого поля. Например, в конкретных условиях проведения измерений включение или выключение настольной лампы накаливания на расстоянии 1 м от приемника не оказывает влияния на прием, в то время как выключение комнатной люстры при низких уровнях сигнала почти всегда полностью прерывает прием. В других условиях может быть иначе. Отметим, что аналоговая система не настолько нежна.

Близко расположенная (примерно 0,5 м) энергосберегающая лампа 11 Вт оказывает влияние на прием цифрового сигнала (рис. 4, *а* и *б*). На рис. 4,*а* показаны результаты приема одной и той же станции с включенной лампой, а на 4,*б* – с выключенной. Несмотря на неодинаковые уровни сигнала (не в пользу 4,*б*), различие весьма заметно. Количественно оно эквивалентно изменению С/Ш примерно до 5–7 дБ. На рисунках также показаны оценки, полученные на антенне длиной 4 м.

Во многих случаях улучшению приема способствует использование удлиненной антенны (провод длиной 4–5 м). При этом, несмотря на одновременное увеличение уровня внешних помех, итоговый эффект положительный, примерно до 3–5 дБ.

Иллюзии и реальность. Как можно видеть из результатов зарубежных и отечественных измерений, прием в диапазоне коротких волн требует существенно большей напряженности поля, чем предполагалось по результатам теоретических оценок, отраженных в Рек. BS.1615. Эти различия на разных трассах и частотах составляют от 15 до 30 дБ. Проведенные годовые испытания на 15 радиолиниях показали, что надежная работа цифровой системы на КВ в обычных бытовых условиях приема и при реальных помехах может быть реализована при напряженности поля не менее примерно 55–60 дБ. И то, не для всех ситуаций. Стандарт DRM, задуманный как средство спасения для коротких волн, не в состоянии справиться с глубокими и каждый день разными замираниями ионосферных сигналов, существующими в природе. Аналоговые сигналы, которые сглаживают некоторые недостатки и как бы прячут их от нашего слуха, создали иллюзию, что все не так страшно, и умный DRM это с легкостью победит. Но замирания (10–20 дБ и более, длящиеся от минут до часов),

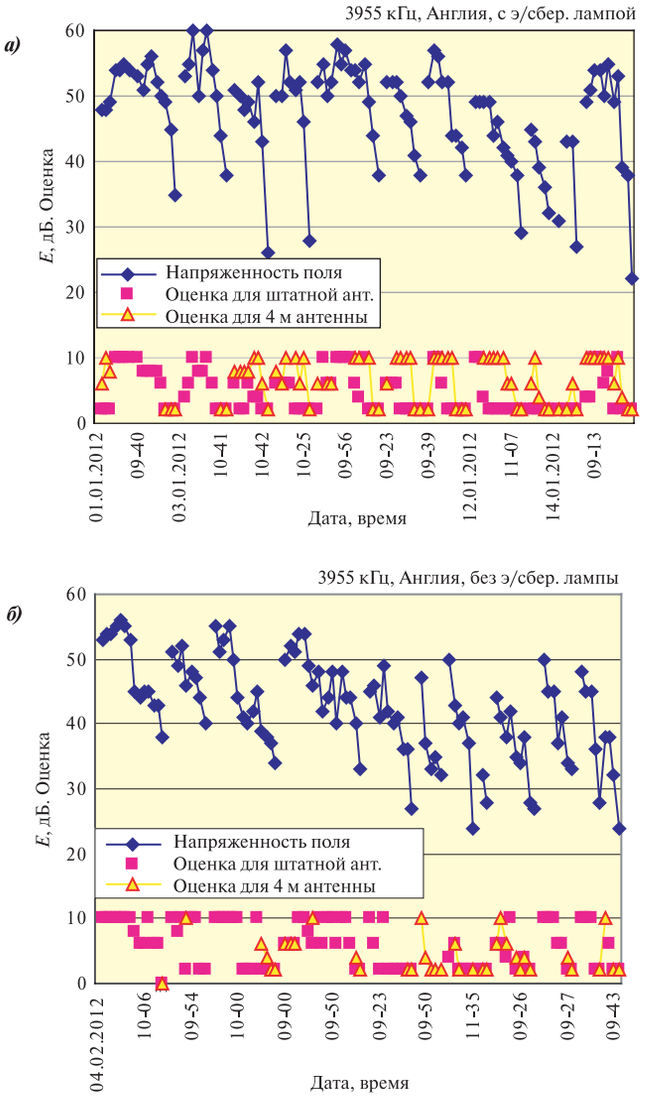

Рис. 4

кто их одолеет? Не говоря уже о других недугах, отмеченных выше. А помехи, чувствительность к которым у DRM намного выше, чем предполагалось при его создании? Как видим, реальность настолько сложнее «всяких схем», что требуется крепкое раздумье, прежде чем будет понято, где и как применить DRM.

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведен пример типичного реального поведения сигнала в ночное время на линии протяженностью около 4400 км (Индия). Режим работы 16 и 64QAM. Такие трассы характерны для иновещания. Наблюдения охватывают почти годовой период. Прием проводился в бытовых условиях, описанных выше. Не идеальных. Из рисунка видно, что неравномерность уровня сигнала в течение года достигает 30 дБ при среднем уровне 40–45 дБ (цифровая мощность передатчика 50 кВт). Стабильность

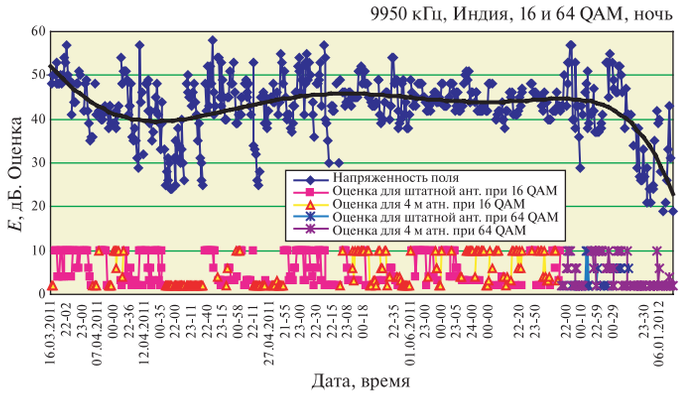

Рис. 5

приема неудовлетворительная, и повышение мощности в 2–3 раза положение не исправит.

Заключение. В каждой из трех частей работы есть свои локальные выводы. Можно только еще раз обратить внимание на то, что в жизни действует большое число факторов, которые заранее невозможно предвидеть и учесть. Все они усложняют прием цифровых сигналов, вынуждая увеличивать их уровень. Но даже и эта мера не всегда помогает, как при многолучевости или саморазрушении сигнала на коротких волнах, так и при постоянно присутствующих помехах. Ряд подобных причин действуют и в диапазонах средних и длинных волн.

Из всего рассмотренного в данной работе следует один, по-видимому наиболее важный вывод. Без региональных дополнительных изучений организовать дееспособную цифровую сеть вещания на СВ и ДВ будет затруднительно. Что касается коротких волн, основная причина низкой надежности приема кроется в физически существующих глубоких и продолжительных замираниях и в обилии местных шумов и помех от других станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горшкова Э.З., Думбрава З.Ф., Кияновский М.П., Поддельский Н.П.** Квазирегулярная и статистическая структура сигналов при наклонном распространении радиоволн. – Техника средств связи, серия системы связи (СС). –1987. – №5.
2. **Грисдейл Г., Моррис Дж., Палмер Д.** Замирания радиосигналов на больших расстояниях и сравнение разнесенного приема с приемом при поляризационном разносе в диапазоне 6–18 МГц. / Краткая информация по материалам зарубежных журналов. – М.: Связьиздат. – 1958. – № 9(38).
3. МСЭ-R, Рек. BS.703, Справочные характеристики АМ звуковых радиовещательных приемников для планирования.
4. МСЭ-R, Рек. BS.1615-1, Параметры планирования для цифрового звукового радиовещания на частотах ниже 30 МГц.
5. МСЭ-R, WP6E-C-0054. Цифровое радиовещание на частотах ниже 30 МГц// Отчет для МСЭ-R. – 2004.
6. МСЭ-R, Рек. P.842-4, Расчет надежности и совместимости ВЧ радиосистем.

Получено 01.03.12