

Введение

Рекомендация ITU-R BS.1114 определяет пять градаций качества для систем радиовещания:

- очень высокое качество звуковоспроизведения с запасом на процессорную обработку;
- субъективно безукоризненное (ясное, прозрачное) звучание, достаточное для радиовещания высшего класса;
- высокое качество звуковоспроизведения, эквивалентное качеству радиовещанию с частотной модуляцией;
- среднее качество звуковоспроизведения, эквивалентное по качеству хорошему радиовещанию с амплитудной модуляцией;
- качество звуковоспроизведения, пригодное только для передачи речи.

Для систем радиовещания с частотной модуляцией (ЧМ) первые две градации недоступны! Для систем радиовещания с амплитудной модуляцией (АМ) первые три градации недоступны!

В 2001 г. в России проведено экспериментальное исследование АМ системы с динамическим управлением уровня несущей частоты на действующем передатчике мощностью 300 кВт на частоте 153 кГц [1.70]. Исследование показало, что экономия мощности на уровне выходного каскада передатчика доходит до трех раз, а в целом по передатчику достигает примерно двух раз. В настоящее время многие передатчики перешли на этот экономичный режим работы. Позже было отмечено (Док. 6А/407, 2014 г., п. 2, Дополнение 1), что «Передача стандарта DRM (диапазоны НЧ, СЧ, ВЧ) может быть сконфигурирована таким образом, чтобы получить зону покрытия аналогичную АМ станции, при требовании к средней мощности на 4...6 дБ ниже по сравнению с аналоговой передачей». Еще чуть позже это утверждение было уточнено следующим образом: «аналоговая система с управляемой несущей во многом решает эту проблему, сведя разницу до 1...3 дБ».

У систем ЦРВ, рекомендованных для применения на частотах ниже 30 МГц по сравнению с системами диапазона ОВЧ, есть одно очень важное преимущество: большая дальность действия, на КВ — это практически весь мир, на ДВ и СВ — многие сотни километров. Но DRM на этих частотах — это также мощная сеть. По этой причине ряд исследователей предлагает альтернативный вариант: заменить мощную и дорогую сеть в диапазонах НЧ и СЧ большим числом гораздо менее мощных станций ОВЧ диапазона или, например, спутниковыми системами, охватывающими всю территорию страны. Но этот последний вариант явно неприемлем с точки зрения надежности доставки информации до населения в условиях чрезвычайной ситуации. Именно

по этой причине полосы частот ниже 30 МГц всегда будут востребованными, особенно в странах с большой территорией.

В 2008 г. в формате DRM работало 44 станции, из них в диапазонах ДВ, СВ — 18 станций, в КВ диапазоне — 26 станций, т. е. ДВ и СВ станции занимали 41 %. В 2012 году имеем всего 26 станций, в ДВ и СВ диапазонах 2 (7,7 %) и в КВ диапазоне 24 станции, а всего станций в 1,69 раза меньше, чем в 2008 г. За последние годы число работающих DRM-передатчиков на частотах ниже 30 МГц уменьшилось. Однако число стран, где уже используются DRM-передатчики или проявляющих интерес к данной технологии, не уменьшилось, скорее, можно говорить о возрастающем интересе к этой цифровой технологии. Еще одним немаловажным тормозом на этом пути является отсутствие массового производства бытовой радиоприемной аппаратуры, способной принимать сигналы формата DRM, её номенклатура сегодня крайне ограничена.

Развитие цифрового вещания идет также в диапазоне ОВЧ. Здесь картина принципиально иная:

- передатчики, работающие в диапазоне ОВЧ, на порядок компактнее, легче по весу, проще устанавливаются, не требуют специальных мощных подводов электроэнергии, устройств охлаждения;
- введение цифровых систем в сетях ОВЧ (кроме повышения стабильности принимаемого сигнала) позволяет многократно увеличить число передаваемых программ, что обеспечивает не только значительную экономическую выгоду, но и существенно расширяет сферу информационных и развлекательных услуг, предоставляемых населению;
- передатчики диапазона ОВЧ мобильны, не требуют высоких дорогих антенн, во многих случаях могут работать без постоянного присутствия персонала, легко конфигурируются в одночастотные сети;
- сигналы в диапазоне ОВЧ распространяются в пределах прямой видимости, практически не имеют значительных замираний, поэтому вопрос о запасе по мощности остро не стоит;
- каждый передатчик ОВЧ-диапазона является самостоятельной единицей, имеет небольшую зону обслуживания, на больших расстояниях он никому не мешает.

Именно эти положительные стороны в настоящее время способствуют широкому распространению систем ЦРВ в диапазоне ОВЧ.

В отличие от этого в диапазонах НЧ, СЧ, ВЧ все не так очевидно. Есть страны, где весь год сохраняется одинаковый зеленый покров, почти постоянная температура, в дневное время стабильный уровень сигнала. В таких условиях, однажды подобрав параметры сети, можно

быть уверенным, что сеть будет работать без сбоев. В других странах, преимущественно на средних и высоких широтах, поведение сигнала в изменяющихся природных условиях существенно сложнее. Не имея долговременного опыта работы с цифровой системой в сложных условиях, охватывающих все возможные природные изменения, как сезонные, так и спонтанные, администрациям с большим числом мощных передатчиков трудно решиться на модернизацию сети, требующую больших вложений, не будучи убежденными, что это не будет убыточным. Еще более неясным является вопрос о работе цифровой сети в темное время суток при наличии взаимных помех по ионосферным каналам. И еще одно замечание. Диапазон КВ обладает наиболее сложным и непредсказуемым поведением сигналов по сравнению с длинными и средними волнами. В нем очень трудно получить высокую надежность и устойчивость работы канала. Наиболее близка к такому неустойчивому состоянию работа ионосферных каналов, т. е. именно в КВ диапазоне лежит психология неверия в систему DRM. Практика показывает, что в диапазоне ВЧ даже в наиболее спокойных средних широтах на большом периоде времени (например, сезоне) добиться надежности выше 80 % чрезвычайно сложно. Это возможно, если во время работы канала не будет помех от других станций или затухание на трассе не превысит допустимых значений. Ни то, ни другое не гарантировано. На высоких широтах положение еще сложнее. Можно предположить, что часть слушателей, столкнувшись с непостоянством приема на КВ, не поверила во всемогущество стандарта DRM, даже несмотря на отсутствие помех и более высокое качество звука в условиях нормального радиоприема. Все это может быть причиной достаточно медленного внедрения DRM.

Возможность передавать информацию на большие расстояния из одного центра без переприема и без опасности нарушения канала по чужой воле, что свойственно только вещанию на частотах ниже 30 МГц, всегда будет востребована, а высокое качество радиоприема — неоспоримое преимущество систем цифрового радиовещания.

1 Системы, характеристики и тенденции в развитии цифрового радиовещания

1.1. Общие сведения о системах цифрового радиовещания

Интеграция Российской Федерации (РФ) в мировое информационное пространство уже невозможна без применения цифровых технологий радиовещания и телевидения, рекомендованных международным союзом электросвязи ITU-R.

Цифровое телерадиовещание (ТРВ) позволяет:

- путем применения наилучших с позиций сегодняшнего дня технологий организовать высококачественное телевизионное и звуковое вещание во всех полосах частот, выделенных ITU-R для его организации. Это особенно важно для России с её крайне неравномерным распределением населения по территории, а также наличием значительных пространств с очень низкой плотностью населения;
- обеспечить возможность адресной передачи (как коллективным, так и избранным пользователям) разнообразной дополнительной информации (данные, текстовая и графическая информация, неподвижные изображения и т. п.);
- значительно повысить эффективность использования радиочастотного ресурса при одновременном существенном увеличении числа и качества передаваемых звуковых программ;
- в несколько раз уменьшить затраты на эксплуатацию передающего оборудования за счет существенной экономии электроэнергии, в значительной мере это относится к диапазону ОВЧ;
- сделать востребованными населением все полосы частот, выделенные России для наземного радиовещания, привлекательными также для коммерческого использования, включая и диапазоны НЧ, СЧ и ВЧ, практически не интересные населению в настоящее время, но очень важные с государственной точки зрения в силу особенностей распространения радиоволн;
- создать единые автоматизированные одночастотные сети доставки программ до населения;

- обеспечить возможность стационарного и мобильного приема программ радиовещания с высоким качеством, включая и многоканальные звуковые форматы, например 5.1.

Изложенный выше перечень пожеланий, задач, требований, относящийся к цифровым системам радиовещания, не всегда может быть в полной мере реализован. Он сводится к нескольким основным положениям [1.1, 1.2].

1. Цифровая технология позволяет иметь больший контроль над эффективностью канала. Позволяет сжать данные в меньший объем. Позволяет организовать одночастотные сети.

2. Главное коммерческое преимущество цифрового радиовещания — способность предложить более высокое качество и многообразие услуг. Это может быть выполнено без потребности в дополнительном спектре, с более низкой мощностью передатчиков, что является привлекательной перспективой для радиовещателей.

3. Из других преимуществ отметим возможность иметь стереопрограммы, включая и многоканальный формат, дополнительные данные, автоматическое переключение станций между различными диапазонами НЧ, СЧ и ВЧ.

В рекомендациях ITU-R BS.1114-9 [1.3], ITU-R BS.1660 [1.4], ITU-R BS.1615-1 [1.5], ITU-R BS.1514 [1.6] представлены особенности построения, технические характеристики и планирование сетей следующих систем наземного цифрового радиовещания:

- T-DAB/DAB+ [1.7–1.14], для неё выделена полоса частот 174...240 МГц, диапазон ОБЧ-III;
- ISDB-T_{SB} [1.3], в телевизионных каналах шириной 6, 7 или 8 МГц для передачи программ звукового вещания выделяется сегмент как одна четырнадцатая часть полосы частот телевизионного канала, полоса частот этого сегмента составляет соответственно 429 (6/14), 500 (7/14), 571 (8/14) кГц. Ширину этой полосы следует выбирать с учетом ситуации в отношении частот, сложившейся в каждой стране;
- DRM [1.1, 1.8, 1.15, 1.19], рекомендована для применения в диапазонах НЧ (30...300 кГц) в полосе частот 0,1485...0,2855 МГц (длинные волны, ДВ), СЧ (300...3000 кГц) в полосе частот 0,5265...1,6065 МГц (средние волны, СВ) и ВЧ (3...30 МГц). В диапазоне ВЧ в разных его частях для радиовещания выделены полосы частот 3,2...3,640, 4,75...4,995, 5,006... 5,06, 5,95...6,2, 7,10...7,30, 9,50... 9,90, 11,65...12,05, 13,6...13,8, 15,10...15,60, 17,55...17,90, 21,45...21,85, 25,67...26,10 МГц (короткие волны, КВ);
- DRM+ [1.3, 1.8, 1.16–1.19], является расширением стандарта DRM, рекомендована для применения в диапазоне ОБЧ (30...300 МГц) в полосах частот, выделенных для радиовещания как

при мобильном, так и стационарном приемах; это полосы частот: ОВЧ-I (65,9...74 МГц), ОВЧ-II (87,5...108 МГц), ОВЧ-III (174...240 МГц);

- IBOC HD Radio FM [1.20, 1.21], рекомендована для диапазона ОВЧ, в настоящее время применяется в полосе частот 87,5...108 МГц;
- IBOC HD Radio AM [1.20, 1.21] для применения в каналах с амплитудной модуляцией, применяется в диапазоне средних частот;
- T-DMB [1.11, 1.13], предназначена для передачи в одном радиоканале одновременно программ телевидения и радиовещания в диапазоне ОВЧ-III (174...240 МГц). Система T-DMB использует транспортные механизмы системы DAB [1.22] и может рассматриваться в этом смысле как её дальнейшее развитие. Именно так она и позиционируется в Европе;
- РАВИС [1.12], отечественная аудиовизуальная информационная система реального времени, рекомендована разработчиками для применения в диапазонах ОВЧ-I (65,9...74 МГц), ОВЧ-II (87,5...108 МГц).

Заметим, что технологии DRM и DRM+ в настоящее время представлены в едином документе DRM [1.17] и рассматриваются как единая система цифрового радиовещания, имеющая режимы работы А, В, С, D (для применения в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ) и режим работы Е (для применения в диапазоне ОВЧ). Это единый стандарт цифрового радиовещания, где в каждой из выделенных для радиовещания полос частот (НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ) рекомендуется для применения тот или иной из указанных выше режимов работы.

Технологии IBOC HD Radio FM и IBOC HD Radio AM также объединены в рамках одного стандарта [1.21].

Система DRM (Digital Radio Mondiale, цифровое всемирное радио) — многофункциональная система цифрового радиовещания — была впервые стандартизована Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI) в 2001 г. Она предназначалась для работы в диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн, т. е. на участках частот ниже 30 МГц, выделенных ИТУ-R для целей звукового вещания.

В 2009 г. была опубликована новая версия стандарта DRM [1.15], в которой диапазон рабочих частот был расширен до частоты 240 МГц. В этой новой версии стандарта добавлен режим работы Е, сама версия системы при работе в этом режиме в ряде публикаций получила название DRM+ . В январе 2014 г. была опубликована последняя версия стандарта DRM [1.17].

Что касается системы DAB (Digital Audio Broadcasting), то изначально она позиционировалась разработчиками только как система

цифрового радиовещания (ЦРВ), предназначенная для передачи звуковых программ разного качества, сопутствующей им информации или просто цифровых данных. Она была разработана в рамках проекта «Eureka-147». Стандарт европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute) на эту систему появился в 1997 г. Первая версия системы DAB предусматривала компрессию цифровых аудиоданных только по стандарту MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer II [1.23] и возможность передачи программ звукового вещания в двух форматах — моно (1/0) и двухканальное стерео (2/0). Позже были разработаны, а затем стандартизованы более эффективные алгоритмы компрессии цифровых аудиоданных [1.24–1.27]. Они были добавлены в новую вторую версию стандарта, получившую название DAB+ [1.14], появившуюся в 2006 г. В частности, были добавлены алгоритмы компрессии, реализованные в кодере HE-AAC v.2 стандарта MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 [1.26] и в стандарте MPEG D Surround [1.27]. Возможность использования алгоритма компрессии MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer II осталась и в этой новой версии стандарта на систему DAB+. Процедуры обработки основных цифровых потоков, структуры фрейма передачи при работе в разных режимах, тип модуляции в этой новой версии стандарта остались без изменений. Изменения коснулись только применяемых алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных, при этом процедуры транспортных механизмов в новой версии стандарта не изменились.

В 2009 г. появилось дополнение [1.14] к системе DAB, посвященное передаче видеoinформации (видеосервисов), что превращает ее уже в полноценную мультимедийную систему T-DMB, ориентированную на мобильный прием программ радиовещания и телевидения.

В 2016 г. появилась последняя версия стандарта на систему DAB [1.10].

Из перечисленных выше систем цифрового радиовещания лишь две из них являются наиболее универсальными и рекомендованными ITU-R для применения в диапазонах частот, где применяется как амплитудная, так и частотная модуляции. Это системы DRM и IBOC HD Radio.

Россия выбрала европейскую платформу цифрового телевидения и радиовещания, а это системы DVB-T2/DVB-T2 Lite, DAB/DAB+ и DRM/DRM+. Однако с внедрением систем ЦРВ в нашей стране пока ещё не до конца всё ясно. Решением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2010 г. выбрана система DRM. Решение Правительства РФ по выбору системы DRM относится только к диапазонам НЧ, СЧ и ВЧ. Как показали многочисленные исследования, выполненные за рубежом, по целому ряду признаков технология, реализованная в стандарте DRM для диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ, является наилучшей

и с этой точки зрения наиболее перспективной. По этой причине сделанный РФ выбор в пользу системы DRM представляется логичным и вполне оправданным. Что же касается режима работы E системы DRM [1.18], рекомендованного для применения в диапазоне ОВЧ, то соответствующего решения Правительства РФ пока нет, но проведенное в Санкт-Петербурге в июне-августе 2015 г. экспериментальное радиовещание в данном формате подтвердило соответствие полученных характеристик заявленным в стандарте значениям. Материалы данной работы в ноябре 2015 г. переданы в ГКРЧ для принятия решения о возможности использования данного режима работы системы DRM в РФ. С июля 2019 г. в Санкт-Петербурге работает опытная зона аналого-цифрового радиовещания в форматах ЧМ и DRM+.

Радиовещание в стандарте DAB в России также пока не регламентировано, хотя соответствующие экспериментальные исследования проведены. В частности, в 2014 г. в МТУСИ по заказу РТПС было проведено экспериментальное радиовещание в формате DAB+. Заявленные в стандарте характеристики системы DAB+ в ходе выполнения этой работы также были подтверждены, позже материалы данной работы были переданы ГКРЧ для принятия соответствующего решения. Отметим, что все существующие в настоящее время в мире сети наземного радиовещания в формате DAB развернуты только в полосе частот 174...240 МГц диапазона ОВЧ, соответственно для него продаются бытовые приемники.

В заключение отметим следующее. 11 сентября 2018 г. в Министерстве цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации состоялось заседание государственной комиссии по радиочастотам. На этом заседании было поддержано решение о выделении полос радиочастот 65,9...74 МГц и 87,5...108 МГц для создания на территории России сетей цифрового радиовещания стандарта DRM+*. Ранее аналогичное решение было принято для системы DAB+, для которой в России выделена полоса частот 174...230 МГц. В 2019 г. по заказу РТПС в Санкт-Петербурге была организована зона аналого-цифрового радиовещания в форматах ЧМ и DRM в общем радиоканале на частотах 95,7 и 95,9 МГц. Планируется продолжить этот эксперимент и в 2020 году.

1.2. Обобщенная структурная схема и характеристики систем цифрового радиовещания

Структура любой системы цифрового радиовещания (рис. 1.1) содержит три основных части (на примере системы DRM): контент-сервер, модулятор, собственно передатчик и GPS-приемник. Контент-

* РИА Новости, <http://ria.ru/society/20180911/1528303185.html>.

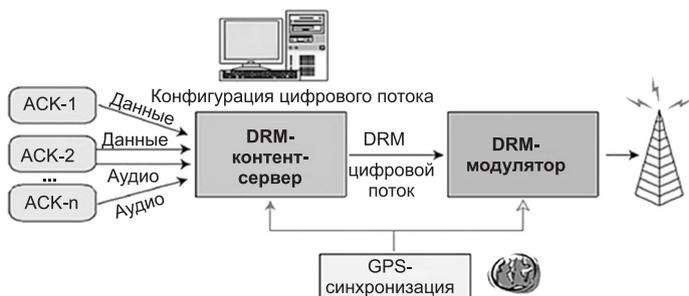


Рис. 1.1. Урупненная структурная схема системы цифрового радиовещания

сервер служит для обработки цифровых данных, поступающих от поставщиков программ АСК-1, ..., АСК-*n*, здесь обычно выполняются компрессия и мультиплексирование цифровых данных с целью их последующей передачи к модулятору. Далее модулированный сигнал поступает на передатчик и после усиления излучается в эфир. Синхронизация оборудования выполняется с помощью GPS-приемника.

Основные технические характеристики перечисленных выше систем цифрового радиовещания, рекомендованных ИТУ-Р для применения в наземном радиовещании представлены ниже. Все они удовлетворяют требованиям рекомендации МСЭ-Р BS.774 [1.28].

Характеристики и параметры качества системы цифрового радиовещания DAB/DAB+ (Digital Audio Broadcasting — Европейская платформа цифровых технологий радиовещания).

Удовлетворяет всем требованиям Рекомендаций ИТУ-Р BS.774 и ВО.789, принята в Европе в качестве стандарта ETSI EN 300 401 для звукового вещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники.

Диапазон несущих частот, МГц:	174...240 (наземная сеть); 1452...1492 (спутниковая сеть)
Применение	Для приема программ на автомобильные, переносные и стационарные приемники; для работы в условиях многолучевости; позволяет использовать ретрансляторы в совмещенном канале для покрытия областей с затененными территориями; для работы в одночастотной сети; позволяет обеспечить массовое производство недорогих бытовых приемников

Применение режимов работы:

одночастотная сеть, региональные сети, ..	Режим работы 1 (ТМ I)
региональные сети, локальные сети,	Режим работы 2 (ТМ II)
отдельные передатчики	Режим работы 3 (ТМ III)
спутниковое и кабельное радиовещание	Режим работы 4 (ТМ IV)

Номинальное значение центральной несущей частоты радиоканала, МГц, кратно частоте, кГц	16
Полоса частот радиоканала, МГц, не более:	
на уровне излучения –26 дБ	1,536
на уровне излучения –56 дБ	1,94
на уровне излучения –71 дБ	1,94
на уровне излучения –106 дБ	3,5
Радиосигнал системы DAB:	
тип модуляции	COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex)
модуляция поднесущих частот в частотном блоке DAB	DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
Параметры COFDM-символов при работе в режимах:	
TM I:	
длительность кадра передачи	96 мс
длительность нулевого символа	1,297 мс
длительность COFDM-символа	1,246 мс
длительность защитного интервала	246 мкс
число передаваемых поднесущих	1536
расстояние между поднесущими частотами	1 кГц
TM II:	
длительность нулевого символа	324 мкс
длительность COFDM-символа	312 мкс
длительность защитного интервала	62 мкс
число передаваемых поднесущих	384
расстояние между поднесущими частотами	4 кГц
длительность кадра передачи	24 мс
TM III:	
длительность кадра передачи	24 мс
длительность нулевого символа	168 мкс
длительность COFDM-символа	156 мкс
длительность защитного интервала	31 мкс
число передаваемых поднесущих	192
расстояние между поднесущими частотами	8 кГц
TM IV:	
длительность кадра передачи	48 мс
длительность нулевого символа	648 мкс
длительность COFDM-символа	623 мкс
длительность защитного интервала	123 мкс
число передаваемых поднесущих	768
расстояние между поднесущими частотами	2 кГц
Системная тактовая частота, МГц	2,048
Формат передачи	по фреймам
Суммарная скорость передачи, кбит/с	2400
Каналы цифровых потоков:	
канал пользователя MSC	Программы радиовещания, сопутствующие им данные, дополнительные данные AIC, которые не могут быть переданы в канале FIC

канал быстрой информации FIC:.....	Данные о конфигурации мультиплексирования MCI, сервисная информация SI, информация быстрого доступа FIDS
канал синхронизации SC.....	Нулевой символ OFDM Опорный символ OFDM
Скорость передачи данных в канале MSC, кбит/с.....	2304
Скорость передачи данных в канале FIC, кбит/с.....	96 (режимы работы I, II, IV); 128 (режим работы III)
Входные сигналы системы DAB:	
звуковые сигналы радиовещания:	
частота дискретизации, кГц.....	48, 24
квантование.....	Равномерное, ИКМ, 16...22 бит/отсчет
предыскажение.....	Рек.651 МККР
интерфейс AES/EBU.....	Документ IEC 958
полоса частот исходного аналогового сигнала, Гц.....	20...20000; 40...15000; 50...7000
цифровые сигналы данных:.....	Связанные с программами радиовещания, сервисная информация, данные о конфигурации мультиплексирования
Возможность передачи данных общей информации в каналах пользователя MSC.....	
Имеется	
Форматы звуковых сигналов.....	
Моно; обычное стерео, совмещенное стерео, многоканальное стерео	
Кодирование звуковых сигналов радиовещания:	
DAB (ETSI EN 300 401 v.1.4.1 (2006-01)):	
стандарт кодирования.....	MPEG-1 ISO/IEC 11172-3
уровень кодирования.....	Layer 2
объем выборки звукового сигнала.....	1152 отсчета звукового сигнала
длительность звукового фрейма, мс.....	24
скорость цифрового звукового потока, кбит/с.....	32, 48, 56, 64, 96, 112, 128 , 160, 192 (на один канал), 64, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384 (для стерео, со- вмещенное стерео, на два канала)
DAB+ (ETSI TS 102 563 v1.1.1 (2007-02)).MPEG-4 HE-AAC v.2, MPEG D Surround	
Защита от ошибок:	
в структуре данных звукового фрейма:	
защита преамбулы (Header).....	CRC-код
защита масштабных коэффициентов SCF	CRC-код
в канале пользователя MSC:	
помехоустойчивое кодирование.....	Сверточный код, временное перемеже- ние логических фреймов с глубиной 16 фреймов (384 мс)
в канале быстрого доступа FIC:	
помехоустойчивое кодирование.....	Сверточный код
в радиоканале:.....	
Перемежение ячеек модуляции	
Скремблирование с целью устранения нежела- тельной регулярности в передаваемом цифро- вом сигнале.....	
Имеется	