Сравнительная оценка энергетической эффективности систем аналогового ЧМ– и цифрового DRM–радиовещания

Comparative assessment of the energy efficiency of analogue FM and digital DRM broadcasting systems

Ковалгин /Kovalgin Yu.
Юрий Алексеевич
(kowalgin@sut.ru)
доктор технический наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
член-корреспондент Международной академии наук высшей школы.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»,
профессор кафедры телевидения и метрологии.
г. Санкт-Петербург

Соколов / Sokolov S.
Сергей Анатольевич
(sokolov@digiton.ru)
ООО "Дигитон Системс",
генеральный директор
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Digital audio broadcasting, digital radio switchover, DRM, FM, DRM-FM, Digital Radio Mondiale, VHF Band.

Изложены результаты сравнительной оценки энергетической эффективности систем ОВЧ-ЧМ- и DRM-радиовещания, работающих в диапазоне ОВЧ, как в условиях стационарного, так и мобильного приема программ. Показано, что наибольший энергетический выигрыш при переходе к цифровому радиовещанию в формате DRM (режим устойчивости E) при равенстве радиусов зон покрытия обеспечивается в крупных мегаполисах, где велик уровень индустриального шума, меньший выигрыш – в зоне среднего города и наименьший – в сельской зоне. Приведены конкретные значения энергетического выигрыша для разных условий приёма, видов модуляции и скорости кода.

The results of a comparative assessment of the energy efficiency of VHF-FM and DRM broadcasting systems operating in the VHF band are presented, both in conditions of stationary and mobile reception. It is shown that the greatest energy benefit in the digital radio switchover to the DRM system (DRM Mode E) with equal coverage area radii is provided in large metropolitan areas, where the level of industrial noise is high, a smaller energy benefit is in the area of an average city and the smallest is in the rural area. Specific values of the energy benefit are given for different reception conditions, modulation types and code rates.

Введение

С внедрением систем цифрового радиовещания (ЦРВ) в нашей стране пока ещё не всё ясно. Решением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2010 г. выбрана система DRM. Это решение 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 [1]. Что же касается режима устойчивости E системы DRM, рекомендованного для применения в диапазоне ОВЧ, то соответствующего решения Правительства РФ пока нет. Однако проведённое в Санкт-Петербурге в июне–августе 2015 г. экспериментальное радиовещание в данном формате подтвердило соответствие полученных характеристик заявленным в стандарте значениям. По результатам данной работы 11 сентября 2018 г. в Министерстве цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации состоялось заседание государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ). На нём 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. В 2019 и в 2021 годах по заказу РТРС в Санкт-

Петербурге была реализована опытная зона аналого-цифрового радиовещания в форматах ЧМ и DRM в общем радиоканале на частотах 95,7 и 95,9 МГц.

Многими исследователями утверждается, что переход к ЦРВ – это не только экономия радиочастотного ресурса, увеличение числа и качества передаваемых программ, объема сопутствующей им мультимедийной информации, но также и существенная экономия электроэнергии [1,3–7]. Однако конкретных, а самое главное достоверных сведений, подтверждающих данное заключение, в опубликованный литературе до сих пор нет.

Цель работы заключается в оценке энергетической эффективности цифрового радиовещания в формате DRM по отношению к аналоговому ЧМ-радиовещанию при работе в диапазоне ОВЧ.

Основная часть. Напомним, что прогнозируемая напряжённость поля, создаваемая передатчиком на расстоянии d от него с учётом суммарных отклонений напряженности поля и поправочных коэффициентов, обусловленных условиями приёма, определяется выражением:

$$E_{пер}(d) = E_{пер}(f, h_{1эфф}, h_2, d, T, L, P_{эим} = 1\ кВт) + 10\lg P_{кВт} + 10\lg G - 10\lg A + 10\lg D(\varphi) - \Delta_{max}(L,T,f), \quad (1)$$

где: $E_{пер}$ (f, $h_{1эфф}$, h_2, d, T, L, $P_{эим}$=1 кВт) – прогнозируемая медианная напряженность поля, дБ(мкВ/м), создаваемая передатчиком с эффективной излучаемой мощностью $P_{эим}$ = 1 кВт на расстоянии d (км), с несущей частотой f (МГц) при высотах подвеса передающей и приемной антенн $h_{1эфф}$ и h_2, м, соответственно для T (%), времени превышения медианного значения и для L (%) числа мест в зоне покрытия; G и A – коэффициенты передачи передающей антенны и затухание в фидере (по мощности), $D(\varphi)$ – характеристика направленности антенны, также по мощности; $\Delta_{max}(L,T,f)$, – суммарные стандартные отклонения напряженности поля и поправочные коэффициенты для несущей частоты f, учитывающие условия приёма и процент мест охвата L (%) и время T (%), в течение которого превышаются медианные значения.

Напомним, что частотное планирование для аналоговых сетей ОВЧ-ЧМ-радиовещания выполняется для условия стационарного приема при проценте мест охвата L=50 % и для высоты расположения приемной антенны 10 м над уровнем Земли. При этом для систем ОВЧ-ЧМ- радиовещания при частотном планировании значение $\Delta_{max}(L,T,f)$ принимается равным 0 дБ. В рекомендациях ITU-R BS.412-9 и BS.450-3 [8,9] приведены значения минимальной напряженности поля, которые необходимо принимать во внимание при расчете зоны покрытия аналогового ОВЧ-ЧМ-передатчика (табл. 1). Будем считать, что ЧМ-передатчик работает в стереорежиме и на границе зоны покрытия выполняются условия рекомендации ITU-R BS.412-9, табл. 1 (правый столбец).

Если посмотреть на укрупненную карту г. Санкт-Петербурга (рис. 1), то с учётом сведений, приведённых в табл. 1, для расстояний от телебашни до 20 км минимальное значение требуемой напряженности поля для отличного приёма должно быть не менее 74 дБ (мкВ/м), на расстояниях от 20 до 30 км (пригород Санкт-Петербурга или средний город) это значение должно составлять не менее 66 дБ (мкВ/м), на еще больших расстояниях более 30 км (сельская местность) достаточно иметь напряженность поля не менее 54 дБ (мкВ/м) при работе передатчика в стереорежиме. При монофонической передаче эти значения равны 70 дБ (мкВ/м), 60 дБ (мкВ/м) и 48 дБ (мкВ/м) соответственно.

Рассчитаем с учётом этих значений, используя выражение 1 и сведения рекомендаций ITU-R P.1546-7 [10] и P.528-3 [11], зависимость требуемой мощности передатчика от радиуса зоны покрытия при ОВЧ-ЧМ-радиовещании. Расчёты выполним для значения несущей частоты 95,9 МГц при работе передатчика в стереорежиме для случая фиксированного приёма (FX). При

Таблица 1

Минимальная напряженность поля для приёма сигналов аналогового ОВЧ-ЧМ-радиовещания [ITU-R BS.412-9], [8]

Зона радиовещания	Формат радиовещания	
	Монофонический дБ (мкВ/м)	Стереофонический дБ (мкВ/м)
Сельская местность	48	54
Город	60	66
Большой город	70	74

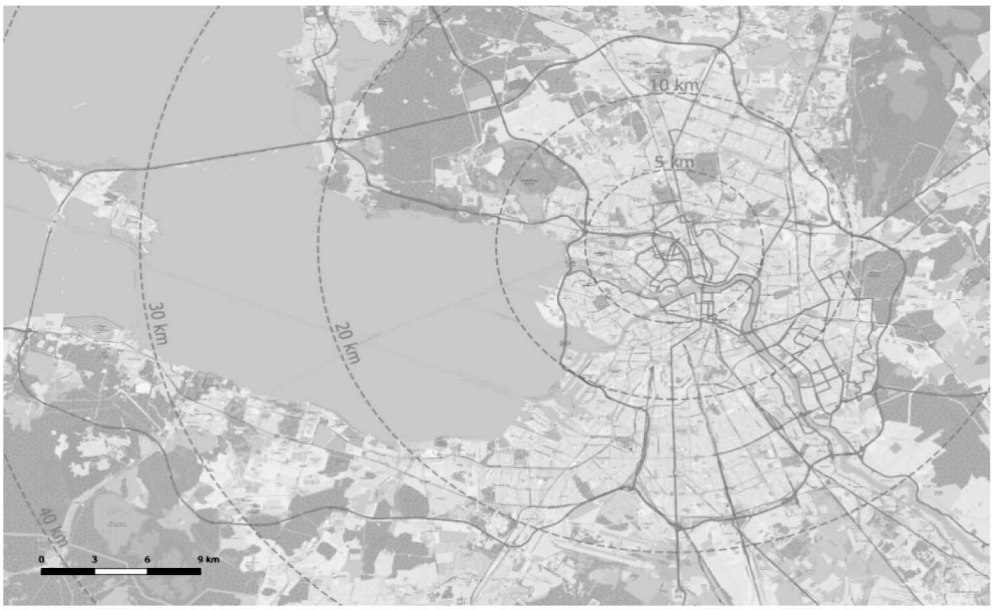

Рис.1. Укрупненная карта города Санкт-Петербург

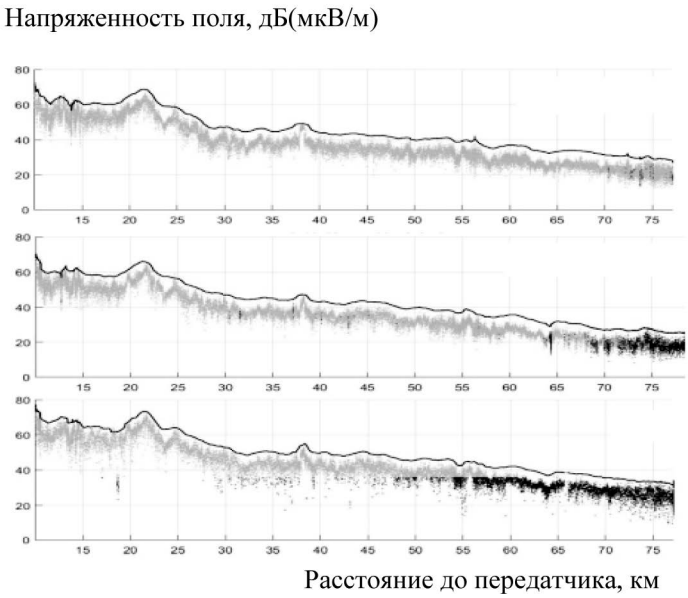

Рис. 2. Кривые изменения напряженности поля передатчиков с расстоянием: верхняя и средняя кривая получены для DRM-передатчика мощностью 640 Вт при модуляции QAM-4 и скорости кода 0,25 и модуляции QAM-16 и скорости кода 0,625 соответственно; нижняя кривая получена для ЧМ-передатчика мощность 3000 Вт. Оба передатчика работают на один тот же антенно-фидерный тракт. На каждом рисунке изображены две кривые: верхняя кривая – это изменение напряженности поля передатчика, дБ(мкВ/м); нижняя кривая – напряжение на входе приемника, дБ(мкВ) с учётом антенного фактора [2,3,15]

этом высоту приемной антенны над уровнем Земли примем равной 10 м, а число мест охвата L=50%, как это и требуется нормативными документами [12,13].

Расчёт выполним по формуле:

$$P = 10^{B/10} \text{ кВт}, \qquad (2)$$

для L = 50 %, и T = 50 % , причём в этом случае величина $\Delta_{max}(L,T,f)$=0, как это и требует рекомендация ITU-R BS.412-9 [8], и на границе зоны покрытия выполняется условие $E_{min} = E_{ОВЧ\text{-}ЧМ}$; тогда, принимая во внимание выражение (1), получим:

$$B = E_{ОВЧ\text{-}ЧМ} - E_{пер}(f,\ h_{1эфф},\ h_2,\ d,T,L,P = 1 \text{ кВт}) -$$
$$- 10\lg G + 10\lg A - 10\lg D(\varphi), \text{ дБ(мкВ/м)}, \qquad (3)$$

где $E_{овч\text{-}чм}$ – требуемая стандартом для аналогового ОВЧ-ЧМ-радиовещания напряженность поля на границе зоны покрытия для разных мест приёма (табл. 1).

В настоящее время все большее значение приобретает мобильный приём (МО), когда высота приемной антенны над уровнем Земли составляет в среднем 1,5 м. Высота подъема приемной антенны над уровнем Земли имеет важное значение. Напряженность поля уменьшается при изменении ее высоты с 10 м до 1,5 м в среднем на 8...10 дБ [12]. По данным [14] эта величина составляет около 12 дБ, правда для более высоких частот диапазона ОВЧ, выделенных для систем цифрового телевидения. Учитывая, что для систем ЧМ-радиовещания нет порогового эффекта при радиоприеме, примем при расчете зоны покрытия при мобильном приеме величину этой поправки для несущей частоты 95,9 МГц равной L_h= 9,796 дБ [13].

Далее также для примера на рис. 2 приведены измеренные С. В. Мышьяновым в реальных условиях кривые изменения напряженности поля DRM- и ЧМ-передатчиков с расстоянием. При этом мощности данных передатчиков составляют 3000 Вт и 640 Вт соответственно, несущие частоты равны 95,7 МГц и 95,9 МГц, усиление антенны 6 дБм, потери в фидере 1,575 дБм, высота подвеса передающей антенны 278 м, приемной – 1,5 м. Темным цветом обозначены места, где приём невозможен (DRM-приём) или его качество не соответствует стандарту (ЧМ-приём).

Уже из этих данных видно, что даже при столь различных мощностях передатчиков радиус зоны покрытия ЦРВ оказывается значительно большим: он превышает 75 км при модуляции QAM-4 и скорости кода 0,25 (наибольшая помехозащищенность), составляет около 65 км при модуляции QAM-16 и скорости кода 0,625 (наименьшая помехозащищенность) и не превышает 50 км для ЧМ-передатчика в случае, когда все параметры соответствуют заявленным в стандартах значениям.

Далее также в качестве примера на рис. 3 и 4 приведены полученные расчётным путём (на основе данных рекомендаций ITU-R P.1546-7, BS.412-9 и BS.450-3) зависимости требуемой мощности ОВЧ-ЧМ-передатчика от радиуса зоны покрытия. Параметром каждой кривой является напряженность поля ОВЧ-ЧМ-передатчика на границе зоны покрытия для крупного мегаполиса (74 дБ (мкВ/м)) городского поселения (66 дБ (мкВ/м)) и сельской территории (54 дБ (мкВ/м)) соответственно для стационарного (рис. 3) и мобильного (рис. 4) условий приёма. В табл. 2 приведены расчётные данные изменения прогнозируемой мощности ОВЧ-ЧМ-передатчика с расстоянием.

Из табл. 2, рис. 3 и рис. 4 следует, что для ОВЧ-ЧМ-передатчика мощностью 3 кВт при высоте подвеса и усилении передающей антенны соответственно 278 м и 6 дБм, потерях в фидере 1,575 дБм при стационарном приёме (FX) радиус зоны покрытия

Таблица 2

Прогнозируемая медианная напряженность поля при мощности передатчика 3 кВт, превышаемая в течение 50% времени и для 50% мест приема при усилении передающей антенны 6 дБм и потерях в фидере 1,575 дБм.
(При наличии оптической видимости для несущей частоты ЧМ-передатчика 95,9 МГц)

Прогнозируемая напряженность поля передатчика, дБ(мкВ/м)	Расстояние от точки приёма до передатчика, км								
	1	10	20	30	40	50	60	70	80
Стационарный приём (FX)	111,85	87,68	77,91	70,3	63,41	58,35	53,46	49,07	44,2
Мобильный приём (МО)	104,05	82,7	76,89	70,1	62,5	50,56	45,67	41,28	36,72

Рис. 3. Требуемая мощность аналогового ЧМ-передатчика от величины радиуса зоны покрытия при стационарном приёме (FX) для разных значений напряженности поля на границе зоны покрытия: P9 – 74 дБ (мкВ/м), P10 – 66 дБ (мкВ/м), P11 – 54 дБ (мкВ/м), P15 – 48 дБ (мкВ/м). Несущая частота 95,9 МГц, высота подвеса передающей и приемной антенн соответственно 278 и 10 метров, коэффициент передачи передающей антенны 6 дБм, затухание в фидере 1,575 дБм, суммарное стандартное отклонение напряженности поля от медианного значения равно $\Delta_{max}(L,T,f)$= 0 дБ

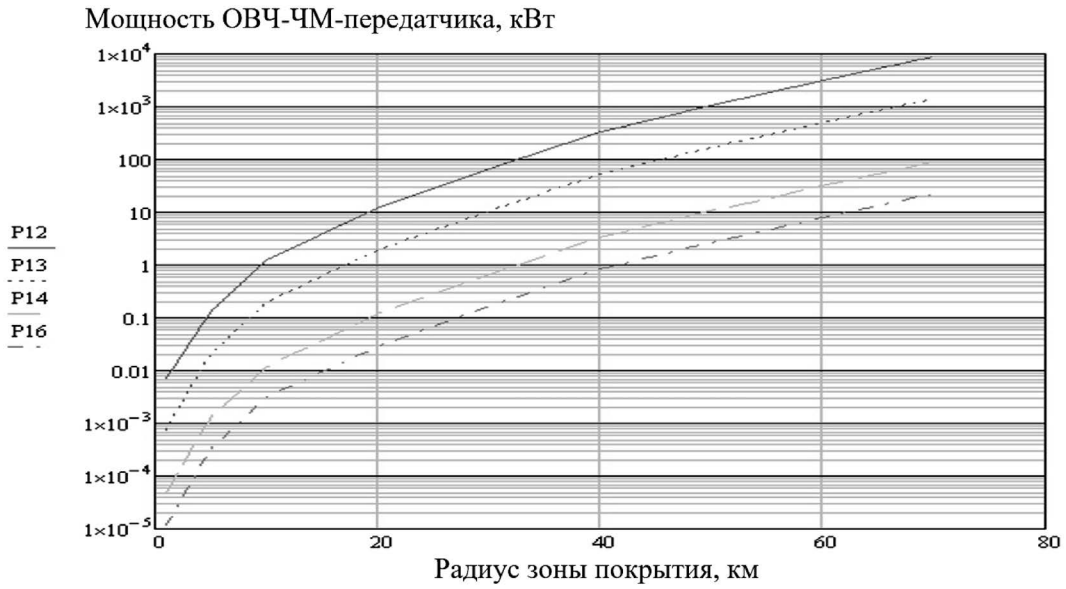

Рис. 4. Требуемая мощность аналогового ЧМ-передатчика от величины радиуса зоны покрытия при мобильном приеме (МО) для разных значений напряженности поля на границе зоны покрытия: P12 – 74 дБ (мкВ/м), P13 – 66 дБ (мкВ/м), P14 – 54 дБ (мкВ/м), P16 – 48 дБ (мкВ/м). Частота 95,7 МГц, высота подвеса передающей и приемной антенн соответственно 278 метров и 1,5 метра, коэффициент передачи передающей антенны 6 дБм, затухание в фидере 1,575 дБм, потери напряженности поля с изменением высоты подвеса приемной антенны с 10 до 1,5 м равны 9,976 дБ, суммарное стандартное отклонение напряженности поля от медианного значения равно $\Delta_{max}(L,T,f)$= 0 дБ

составляет 58,8 км, а при мобильном приёме его величина становится равной 46,9 км.

В обоих случаях на её границе напряженность поля составляет 54 дБ (мкВ/м), как этого и требует рекомендация ITU-R BS.412-9. По результатам измерений, выполненных С. В. Мышьяновым в натурных условиях, радиус зоны покрытия для ОВЧ-ЧМ-передатчика мощностью 3 кВт при мобильном приёме составляет 45...49 км.

Итак, теоретические результаты хорошо согласуются с данными эксперимента, что позволяет для региона Санкт-Петербурга использовать данные рекомендации ITU-R P.1546-7 для практических расчётов без дополнительной коррекции. Однако из этого не следует, что приём ЧМ-программы будет невозможен и на большем расстоянии от передатчика (в зоне оптической видимости), просто качество принимаемого сигнала уже не будет соответствовать требованиям стандарта.

Выражение для расчета прогнозируемой напряженности поля в точке приема для заданного процента мест приёма L и времени превышения T медианного значения для цифрового DRM-передатчика мощностью $P_{кВт}$ может быть рассчитано по формуле:

$$P_{DRM} = 10^{B_1/10}, \text{ кВт},$$

$$B_1 = E_{DRM} - E_{пер}\,(f,\ h_{1эфф},\ h_2,\ d,T,L,P = 1 \text{ кВт}) - 10\lg G + 10\lg A - 10\lg D(\varphi) + \Delta_{max}(L,T,f), \text{ дБ(мкВ/м)}$$

где E_{DRM} – требуемая стандартом на систему DRM минимальная медианная напряженность поля на границе зоны покрытия для каждого из условий приёма (табл. 3), Δ_{max} (L,T,f) – суммарное стандартное отклонение напряженности поля от требуемого медианного значения также для каждого из условий приёма (табл. 3).

Очевидно, что энергетический выигрыш одной системы радиовещания по отношению к другой необходимо оценивать для одинаковых условий приёма и при равных радиусах зон покрытия, т.е. мобильный приём DRM-сигнала следует сравнивать с условием мобильного приёма сигнала ОВЧ-ЧМ-радиовещания, в свою очередь стационарный приём DRM-сигнала нужно сравнивать с приёмом ОВЧ-ЧМ-сигнала также в стационарных условиях и т.д.

Тогда

$$\Delta P = 10\lg(P_{ОВЧ\text{-}ЧМ}/P_{DRM}) = E_{ОВЧ\text{-}ЧМ} - E_{DRM}, \text{ дБ},$$

где E_{DRM} – требуемая напряженность поля DRM-передатчика на границе зоны покрытия для заданного условия приёма, вида модуляции и скорости кода, дБ(мкВ/м), $E_{ОВЧ\text{-}ЧМ}$ – то же самое для ОВЧ-ЧМ-передатчика также в дБ(мкВ/м) с учётом стандартных отклонений и поправок для выбранного условия приёма (табл. 3). Иначе говоря, это напряженность поля, которую должен обеспечить ОВЧ-ЧМ-передатчик в точке приёма на границе зоны покрытия, чтобы обеспечивалась бы для заданного

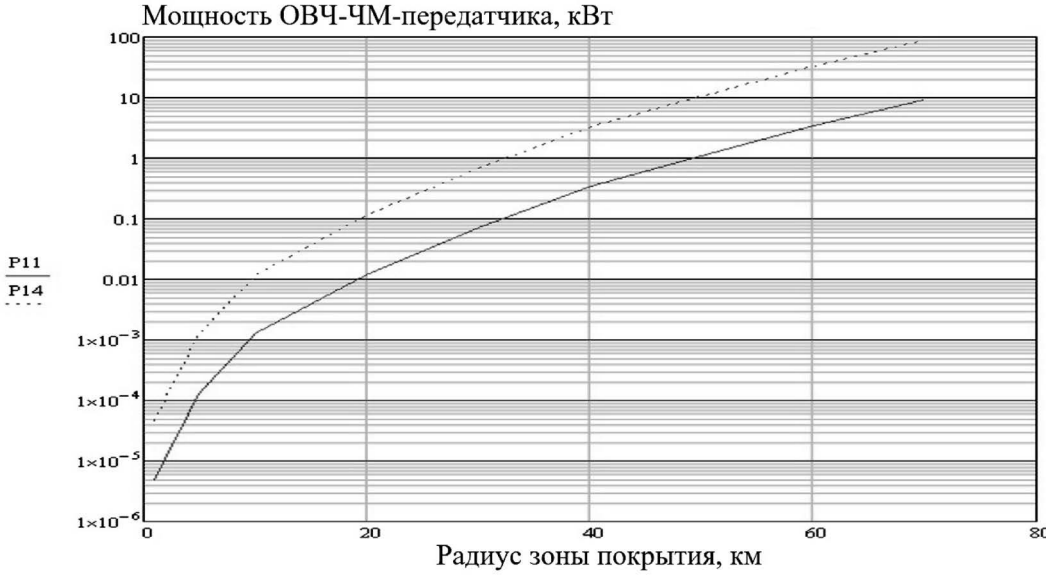

Рис. 5. Требуемая мощность аналогового ОВЧ-ЧМ-передатчика от величины радиуса зоны покрытия для напряженности поля на границе зоны покрытия равной 54 дБ(мкВ/м): P11 – стационарный приём (FX); P14 – мобильный приём (MO, потери напряженности поля с изменением высоты подвеса приемной антенны с 10 до 1,5 м равны 9,976 дБ). Несущая частота 95,7 МГц, высота подвеса передающей и приемной антенн соответственно 278 метров и 1,5 метра, коэффициент передачи передающей антенны 6 дБм, затухание в фидере 1,575 дБм

условия приёма напряженность поля 54 дБ (мкВ/м), как этого и требует соответствующая рекомендация ITU-R. Заметим, что значения поправок (табл. 3) для разных условий приёма заимствованы из рекомендации ITU-R BS.1660-7 [6].

Требуемые для расчётов значения минимальных медианных значений напряженности поля на границе зоны покрытия для DRM-передатчика, а также величины поправок и стандартных отклонений напряженности поля для разных условий приёма приведены в табл. 4. Эти значения также получены с учётом требований рекомендации ITU-R BS.1660-7 [6], а сами вычисления приведены в [8]. В табл. 3 и 4 приняты следующие обозначения: FX – стационарный приём, высота расположения приемной антенны составляет 10 м над уровнем земли; PO – приём вне помещения на переносные устройства; PO-H – прием вне помещения на портативные переносные устройства; PI – приём в помещении на переносные устройства, PI-H – приём в помещении на портативные переносные устройства. Условия PO и PI моделируют приём в пригородной зоне с хорошими условиями и приёмником с всенаправленной антенной; условия PO-H и PI-H моделирую ситуацию приёма в городской среде с плохими условиями приёма и с приёмником, оборудованным внешней антенной. Приём в помещении предполагает, что приёмная антенна расположена на высоте не менее 1,5 м над уровнем пола в помещениях первого этажа, имеющих окно. Приём вне помещения также предполагает, что антенна расположена на высоте 1,5 м над уровнем земли. Кроме того, в обеих таблицах медианный минимальный уровень требуемой напряженности поля на границе зоны покрытия приведён к высоте расположения приемной антенны 10 м над уровнем земли, что позволяет без всяких дополнительных процедур (вычислений) использовать при расчётах кривые распространения радиоволн, приведённые в рекомендациях ITU-R P.1546-7 и P.528-3.

Используя данные табл. 3 и 4, оценим энергетический выигрыш при переходе от аналогового к цифровому формату DRM-радиовещания. При выполнении данных расчетов будем, как и ранее, считать, что несущая частота передатчика составляет 95,7 МГц, эффективная высота подвеса передающей антенны составляет 278 м. Пусть значение радиуса зоны покрытия меняется от 1 до 70 км ступенями: 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 км. Для указанных здесь значений в публикациях имеются экспериментальные данные, необходимые для оценки достоверности полученных результатов. Сравнение выполнено для случая, когда оба передатчика обеспечивают одинаковые радиусы зон покрытия и имеют место одинаковые условия приёма.

Результаты вычислений для разных условий приёма представлены в табл. 5. В качестве примера на рис. 6

Таблица 3

Требуемый минимальный медианный уровень напряженности поля на границе зоны покрытия для разных условий приёма сигнала ОВЧ-ЧМ-передатчика, приведённый к высоте расположения приемной антенны равной 10 м над уровнем Земли

№	Режим приёма		FX	PI	PI-H	PO	PO-H	MO
1	Минимальный уровень напряженности поля на принимающей антенне	дБ (мкВ/м)	54					
2	Поправка на промышленный шум	P_{MMN} (дБ)	10,935	10,935	0,00	10,935	0,00	10,935
3	Потери при уменьшении высоты антенны	L_h (дБ)	0,00	9,796	16,796	9,796	16,796	9,796
4	Потери при прохождении через строения	L_b (дБ)	0,00	8,898	8,898	0,00	0,00	0,00
5	Поправочный коэффициент местоположений	C_l (дБ)	0					
6	Суммарное значение поправок	P_{MMN}, L_h, L_b, C_l, дБ	0	25,69	25,69	9,796	16,976	9,796
7	Вероятность охвата мест	%	50					
8	Минимальный медианный уровень напряженности поля	E_{min}, дБ (мкВ/м)	54	79,69	79,69	63,8	70,79	63,8

Таблица 4

Требуемый минимальный медианный уровень напряженности поля $E_{мед}$ для разных условий приёма, видов модуляции поднесущих частот и скорости кода R для несущей частоты 95,7 МГц при вероятности появления битовой ошибки на выходе приемника не более $BER=10^{-4}$ для системы DRM, приведённый к высоте расположения приемной антенны 10 м над уровнем Земли

№	Модуляция DRM		16-QAM. R = 1/2					
	Режим приема		FX	PI	PI-H	PO	PO-H	MO
1	Потери в фидере	L_c (дБ)	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,274
2	Усиление антенны	G_D, дБ	0,00	−2,20	-19,4	−2,20	-19,4	−2,20
3	Эффективный раскрыв антенны	A_a , (дБм)^2	1,081	–1,12	–18,319	–1,12	–18,319	–1,12
4	Минимальный уровень напряженности поля на принимающей антенне при модуляции QAM-4 для скорости кода: 0,25 0,33 0,40 0,50	E_{min}, дБ(мкВ/м)	2,97 3,41 3,63 4,79	9,799 10,239 10,459 11,619	26,999 27,439 27,659 28,819	9,799 10,239 10,459 11,619	26,999 27,439 27,659 28,819	8,273 8,713 8,933 10,093
5	Минимальный уровень напряженности поля на принимающей антенне при модуляции QAM-16 для скорости кода: 0,33 0,411 0,50 0,625	E_{min}, дБ(мкВ/м)	7,409 8,989 10,009 11,169	15,79 17,37 18,39 19,55	32,939 34,519 35,539 36,699	15,79 17,37 18,39 19,55	32,939 34,519 35,539 36,699	13,413 14,993 16,013 17,29
6	Поправка на промышленный шум	P_{MMN}(дБ)	10,935	10,935	0,00	10,935	0,00	10,935
7	Потери при уменьшении высоты антенны	L_h (дБ)	0,00	9,796	16,796	9,796	16,796	9,796
8	Потери при прохождении через строения	L_b (дБ)	0,00	8,898	8,898	0,00	0,00	0,00
9	Поправочный коэффициент местоположений	C_l (дБ)	3,092	10,887	7,928	9,703	6,209	12,738
10	Суммарное значение поправок	P_{MMN}, L_h, L_b, C_l, дБ	14,027	40,516	33,622	30,434	23,005	33,469
11	Вероятность охвата мест	%	70	95	95	95	95	99
12	Коэффициент распределения	μ	0,52	1,64	1,64	1,64	1,64	2,33
13	Стандартное отклонение напряженности поля DRM	σ_m (дБ)	3,776	3,776	3,776	3,776	3,776	3,776
14	Стандартное отклонение MMN	σ_{MMN} (дБ)	4,53	4,53	0,00	4,53	0,00	4,53
15	Стандартные отклонения при потерях при прохождении через строения	σ_b (дБ)	0,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00
16	Суммарное стандартное отклонение	$\Delta_{max}(L,T,f)$, дБ	5,897	6,617	4,82	5,897	3,76	5,897

17	Минимальный медианный уровень напряженности поля для модуляции QAM-4 при скорости кода: 0,25 0,33 0,40 0,5	E_{min}, дБ(мкВ/м)	 16,997 17,437 17,657 18,817	 50,315 50,755 50,975 52,135	 60,621 61,061 61,281 62,441	 40,23 40,673 40,893 42,953	 50,004 50,444 50,664 51,824	 41,742 42,182 42,402 43,562
18	Минимальный медианный уровень напряженности поля для модуляции QAM-16 при скорости кода: 0,33 0,411 0,50 0,625	E_{min}, дБ(мкВ/м)	 21,436 23,016 24,036 25,196	 56,306 57,886 58,906 60,066	 66,561 68,141 69,161 70,321	 46,224 47,804 48,824 49,984	 55,944 57,524 58,544 59,704	 46,882 48,462 49,482 50,759

Таблица 5

Энергетический выигрыш при равенстве радиусов зон покрытия цифрового радиовещания в формате DRM в режиме работы E по сравнению с аналоговым ОВЧ-ЧМ-радиовещанием для разных условий приёма. Несущая частота 95,7 МГц

Вид модуляции и скорость кода	Ед. измерения	Условия приёма					
		FX	PI	PI-H	PO	PO-H	MO
Модуляция QAM-4, скорость кода (без учёта $\Delta_{max}(L,T,f)$: 0,25 0,33 0,40 0,5	дБм	 37 36,56 36,34 35,18	 29,37 28,94 28,72 27,56	 19,07 18,63 18,41 17,24	 23,57 23,13 22,91 20,85	 20,79 20,35 20,13 18,97	 22 21,62 21,4 20,24
Модуляция QAM-16, скорость кода (без учёта $\Delta_{max}(L,T,f)$: 0,333 0,411 0,500 0,625	дБм	 32,56 30,98 29,96 28,8	 23,38 21,804 20,78 19,62	 13,13 11,55 10,53 9,37	 17,58 16,0 14,98 13,82	 14,85 13,27 12,25 11,09	 16,92 15,34 14,32 13,04
Модуляция QAM-4, скорость кода (с учётом $\Delta_{max}(L,T,f)$: 0,25 0,33 0,40 0,5	дБм	 31 30,66 30,64 29,28	 22,75 22,32 22,1 20,94	 14,25 13,81 13,59 12,42	 17,67 17,23 17,01 14,95	 17,03 16,59 16,37 15,21	 16,1 15,72 15,5 14,34
Модуляция QAM-16, скорость кода (с учётом $\Delta_{max}(L,T,f)$: 0,333 0,411 0,500 0,625	дБм	 26,66 25,08 24,06 22,9	 16,76 15,19 14,16 13	 8,31 6,73 5,71 4,55	 11,68 10,1 9,08 7,92	 11,09 9,51 8,49 7,33	 11,02 9,44 8,4 7,14

представлен энергетический выигрыш для случая мобильного приёма обоих сигналов. Здесь по оси ординат отложено отношение мощности DRM-передатчика по отношению к мощности ОВЧ-ЧМ-передатчика (дБм), при котором обеспечивается равенство их зон покрытия; по оси абсцисс – значения скорости кода отдельно для каждого вида модуляции.

Видно (табл. 5), что при стационаром приёме (FX) обоих сигналов для получения равного радиуса зоны покрытия требуемая для этого мощность DRM-передатчика при модуляции QAM-4 и скорости кода R=0,25 должна быть уменьшена на 31 дБм с учётом суммарных стандартных отклонений и соответственно на 37 дБм без учёта суммарных стандартных отклонений. При модуляции QAM-16 и скорости кода R=0,625 эти значения для DRM-передатчика соответственно будут равны 22,9 дБм и 28,8 дБм.

При мобильном приёме обоих сигналов (рис. 6) энергетический выигрыш при переходе к ЦРВ при равенстве радиусов зон покрытия для модуляции QAM-4 будет изменяться в пределах 22...20,4 дБм при изменении скорости кода от 0,25 до 0,5 без учета суммарного стандартного отклонения $\Delta_{max}(L,T,f)$ и от 16,1 дБм до 13,04 дБм с учетом $\Delta_{max}(L,T,f)$ соответственно. Для модуляции QAM-16 эти значения соответственно составят 16,92...13,04 при $\Delta_{max}(L,T,f)$=0 и 11,02...7,14 дБм при учете суммарного стандартного отклонения при изменении скорости кода от 0,333 до 0,625. Наименьший энергетический выигрыш будет иметь место для условия приёма PI-H при наибольшей скорости кода для выбранного вида модуляции. Он составит (табл. 5) 12.42 дБ и 4,55 дБ соответственно с учётом возможных суммарных отклонений $\Delta_{max}(L,T,f)$ напряженности поля передатчика для данного условия приёма. Это наихудшие возможные значения энергетического выигрыша.

Результаты измерений, выполненных в регионе Санкт-Петербурга в полевых условиях [15], подтвердили полученные значения. Важно, что энергетический выигрыш при переходе к DRM-радиовещанию имеет место для всех условий приёма, выбранных видов модуляции и установленных значениях скорости кода.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Частотное планирование аналогового ОВЧ-ЧМ-радиовещания выполняется из условия стационарного приёма, при этом другие возможные условия приёма, получающие наибольшее распространение в настоящее время (например, мобильный приём) не учитываются, что приводит к существенной ошибке при оценке радиуса зоны покрытия, и, как следствие, к недостоверной оценке энергетической эффективности систем радиовещания.

2. Показано, что величина энергетического выигрыша при переходе от аналогового ЧМ- к цифровому радиовещанию в формате DRM существенно

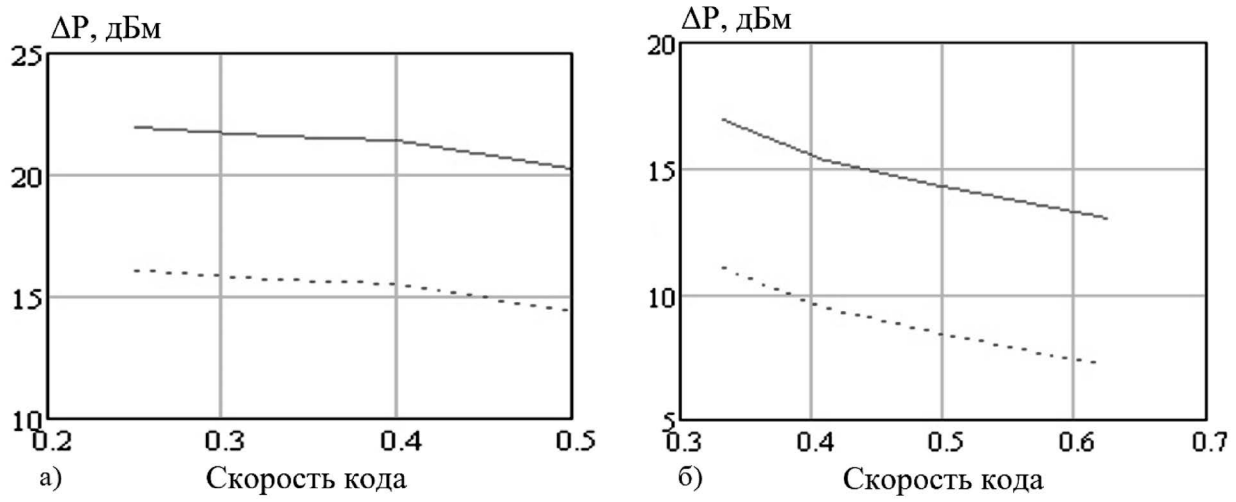

Рис. 6. Зависимости отношения мощности ОВЧ-ЧМ-передатчика к мощности DRM-передатчика для равных радиусах зон покрытия при мобильном приёме обоих сигналов для модуляций QAM-4 (а) и QAM-16 (б) от скорости кода: верхняя кривая получена без учёта суммарных стандартных отклонений $\Delta_{max}(L,T,f)$ при DRM-приёме; нижняя кривая – с учётом $\Delta_{max}(L,T,f)$ при DRM-приёме. При ОВЧ-ЧМ приёме значение $\Delta_{max}(L,T,f)$=0, как это требуют документы частотного планирования сетей ЧМ-радиовещания

зависит от условий приёма сигнала и выбранных характеристик передатчика и меняется в очень широких пределах.

3. Наибольший энергетический выигрыш при переходе к цифровому радиовещанию в формате DRM (режим устойчивости E) при стационарном приёме и равенстве радиусов зон покрытия обеспечивается в крупных мегаполисах, где велик уровень индустриального шума, требующий для высококачественного ОВЧ-ЧМ-радиовещания напряжённости поля на границе зоны покрытия при стереоприёме не менее 74 дБ(мкВ/м), меньший выигрыш будет достигнут в зоне среднего города и наименьший – в сельской зоне.

4. Как показали исследования, при мобильном приёме для получения радиуса зоны покрытия равной ≈ 50 км мощность DRM-передатчика при модуляции QAM-4 и скорости кода R=0,25 должна составлять ≈75 Вт (с учётом суммарного стандартного отклонения) и ≈ 20 Вт (без учёта суммарного стандартного отклонения), что даёт нам значение энергетического выигрыша 16 дБм и 22 дБм соответственно. Для получения данного радиуса зоны покрытия требуется мощность ОВЧ-ЧМ-передатчика 3000 Вт. При модуляции QAM-16 и скорости кода R=0,625 мощность DRM-передатчика должна составлять уже 580 Вт для получения радиуса зоны покрытия около 50 км также при условии мобильного приёма с учётом $\Delta_{max}(L,T,f)$.

5. При наихудшем условии приёма PI-H, модуляции QAM-16 и скорости кода 0,625 энергетический выигрыш составит 4,55 дБм.

Заключение

Изложенное свидетельствует о существенной зависимости радиуса зоны покрытия DRM-передатчика от условий приёма, в меньшей степени от выбранных характеристик передатчика и требует, учитывая наличие порогового эффекта, свойственного системам цифрового радиовещания, тщательного учёта всех факторов при их частотном планировании.

Литература

1. Ковалгин, Ю. А. Цифровое радиовещание: системы и технологии / Ю.А. Ковалгин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 580 с.

2. Соколов, С. А. Исследование аналого-цифровой DRM/ЧМ-зоны радиовещания в полосе частот 87,5–108 МГц / С.А. Соколов, С.В. Мышьянов, Ю.А. Ковалгин // Электросвязь. – 2021. – № 4. – С. 23–29.

3. Мышьянов, С. В. Экспериментальное исследование влияния схем модуляции кодирования на размер зоны обслуживания цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне ОВЧ. Часть 1 / С.В. Мышьянов // Труды учебных заведений связи. – 2021. – № 7 (3). – С. 101–112.

4. ITU–R Document 6A/503-E (5/2011) Digital Radio Mondiale. Results of the DRM Field Trial In Sri-Lanka.

5. ITU–R Document 6A/532-E (5/2011) Digital Radio Mondiale and British Broadcasting Corporation (BBC) Results of the DRM High Power Field Trial in the United Kingdom.

6. ITU–R Document 6A/504-E (5/2011) Digital Radio Mondiale. DRM Single Frequency Network Field Test Results.

7. ITU–R Document 6A/220-E (4/2013) Digital Radio Mondiale (DRM). Field Trial in Rome on the Possible Use of the DRM+ System in VHF Band II to Migrate the FM Sound Broadcasting Service to Digital Technology.

8. Recommendation ITU–R BS.412-9 (12/1998) Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF. BS Series. Broadcasting service (sound).

9. Recommendation ITU–R BS.450–3. Transmission standards for FM sound broadcasting at VHF (1982–1995–2001).

10. Рекомендация МСЭ–R P.1546–7. Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц.

11. Рекомендация МСЭ-R P.528-3 (02/2012). Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ.

12. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Т. 3: Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использованием радиочастотного спектра / под ред. М.А.Быховского. – М.: КРАСАНД, 2012. – 368 с.

13. Рекомендация МСЭ–R BS.1660–8 (06/2019). Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ.

14. Носов, В. И. Оптимизация параметров сети цифрового ТВ-вещания на основе коэффициента использования потенциала передающих станций / В.И. Носов, К.И. Сартаков // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 2. – С. 41–50.

15. Мышьянов, С. В. Экспериментальное исследование влияния схем модуляции кодирования на размер зоны обслуживания цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне ОВЧ. Часть 2 / С.В. Мышьянов // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 138–146.