

Расчет зоны покрытия DRM-передатчиков, работающих в режиме устойчивости Е

Ю.А. Ковалгин¹, С.А. Соколов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²ООО «Дигитон Системс», Санкт-Петербург, 191123, Российская Федерация

*Адрес для переписки: kowalgin@sut.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 17.08.2021

Поступила после рецензирования 02.11.2021

Принята к публикации 08.11.2021

Ссылка для цитирования: Ковалгин Ю.А., Соколов С.А. Расчет зоны покрытия DRM-передатчиков, работающих в режиме устойчивости Е // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 43–53. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-43-53

Аннотация: Изложен метод расчета зоны покрытия DRM-передатчиков, работающих в диапазоне ОВЧ, основанный на учете первичных сведений, имеющихся в рекомендациях ITU-R P.1546-7 и ITU-R BS.1660-8. Приведены результаты вычислений и натурных измерений, подтверждающие достоверность получаемых результатов.

Ключевые слова: цифровое DRM-радиовещание, система DRM, зона покрытия передатчика.

Введение

Внедрение систем цифрового радиовещания (ЦРВ) проходит в жесткой конкурентной борьбе с аналоговой техникой [1, 2]. С внедрением систем ЦРВ в нашей стране пока не все еще до конца ясно. В настоящее время в нашей стране разрешен ввоз оборудования и проведение экспериментальных передач в диапазоне ОВЧ в трех стандартах: DAB, DRM и РАВИС. С 2019 г. в Санкт-Петербурге на частотах 95,7 и 95,9 МГц работает опытная зона аналого-цифрового радиовещания в формах DRM- и ОВЧ-ЧМ. Дальнейшее внедрение ЦРВ в данном формате тормозится не только из-за отсутствия массового производства DRM-приемников, соответствующих нормативных документов, но и методики расчета зоны покрытия цифровых передатчиков, без чего невозможно грамотное частотное планирование сетей цифрового DRM-радиовещания в диапазоне ОВЧ.

Цель статьи состоит в разработке и экспериментальной проверке метода расчета зоны покрытия DRM-передатчиков, работающих в диапазоне ОВЧ.

Основная часть

В соответствии с требованиями нормативных документов на границе зоны покрытия должна обеспечиваться минимальная напряженность поля сигнала передатчика в точке приема и требуемое стандартом минимальное отношение сигнал/шум,

необходимое для передачи аудиоконтента с заданным качеством. Эти условия на границе зоны покрытия должны выполняться одновременно.

Расчет зоны покрытия DRM-передатчика для конкретной территории (города, населенного пункта) можно разделить на следующие основные этапы (рисунок 1).

Этап 1, подготовительный

Этап выполняется при разработке технического задания. На этом этапе происходит выбор и обоснование исходных данных для расчета (шаги 1–3 на рисунке 1) таких как:

- значение несущей частоты радиоканала выбирается на основе тщательного анализа существующей электромагнитной обстановки на выбранной территории, при этом учитываются источники помех от станций, работающих в совмещенных и соседних радиоканалах, уровни атмосферных и промышленных шумов, их распределение по территории покрытия;
- число и качество передаваемых звуковых программ;
- объем, виды и качество приема сопутствующей мультисервисной информации;
- значение максимальной скорости цифровых потоков, необходимой для передачи требуемой ин-

формации с необходимым качеством, последнее зависит от вида модуляции и скорости кода цифрового потока;

- зона покрытия выбирается с учетом особенностей распределения населения по покрываемой территории, зависит также от рельефа местности и наличия искусственных препятствий для профилей трасс в разных радиальных направлениях;
- высота подвеса передающей антенны и рельеф местности определяют максимальный возможный радиус зоны покрытия в диапазоне ОВЧ;
- условия приема звуковых программ и сопутствующей информации;
- требуемая минимальная напряженность поля сигнала передатчика и отношение сигнал/шум в зоне покрытия, зависят от условий приема;
- вид модуляции поднесущих частот и скорость кода при передаче цифровых потоков определяют максимальную скорость цифровых потоков при передаче звуковых программ и мультисервисной информации (берутся из стандарта на систему ЦРВ);
- число радиальных направлений для оценки изменения напряженности поля в зоне покрытия;
- построение с использованием соответствующего программного обеспечения профилей трасс для каждого из выбранных радиальных направлений, уточнение эффективной высоты передающей антенны.

Очевидно, что радиус зоны покрытия r_0 в диапазоне ОВЧ не должен превышать расстояние оптической видимости r_1 . В [3] рекомендуется для цифровых систем вещания максимальный размер радиуса зоны покрытия передатчика выбирать из условия: $r_0 = m \cdot r_1 = (0,6...0,8) \cdot r_1$. Все же эта Рекомендация относится к системам цифрового телевидения, также работающим в диапазоне ОВЧ.

Этап 2, основной (шаги 4–7 на рисунке 1)

Этап включает собственно расчет зоны покрытия для разных условий приема и режимов работы передатчика. К числу исходных данных здесь следует отнести: значения прогнозируемой медианной напряженности поля сигнала передатчика мощностью 1 кВт с расстоянием; величины поправок и стандартных отклонений, обусловленные условиями приема и особенностями распространения радиоволн; значения требуемой минимальной медианной напряженности поля сигнала передатчика в месте приема, зависящие от характеристик приемника и передатчика, определяющие, в конечном итоге число и качество передаваемых программ и дополнительной мультимедийной информации. Остановимся подробнее на каждом из перечисленных моментов.

1) Расчет прогнозируемой медианной напряженности поля сигнала передатчика (см. шаг 4 на рисунке 1).

Первичными данными служат кривые изменения напряженности поля сигнала передатчика $E_{\text{пер}}$,

дБ(мкВ/м), с расстоянием d (км) в течение заданного времени T (%) и для заданного процента мест приема L (%) на обслуживаемой территории.

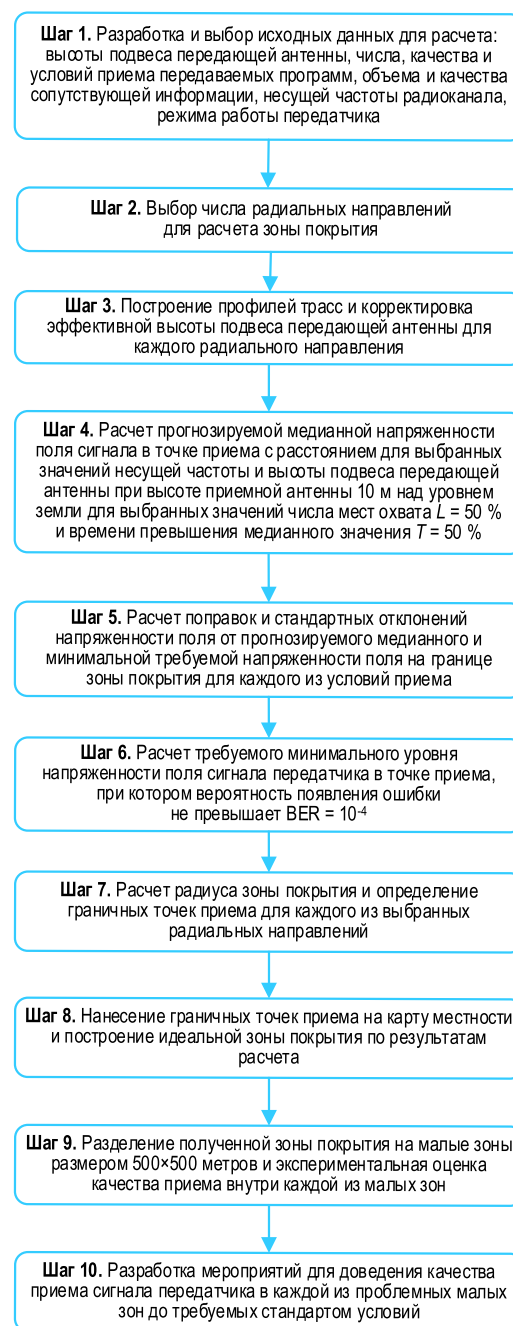


Рис. 1. Пошаговая схема расчета зоны покрытия цифрового передатчика

Fig. 1. Step-by-Step Scheme for Digital Station Coverage Calculation

Данные кривые приведены в Приложениях 2–4 Рекомендации [4]. Они представляют собой верхние пределы прогнозируемых медианных значений напряженности поля при эффективной излучаемой мощности (ЭИМ) передатчика $P_{\text{эим}} = 1$ кВт для так называемых номинальных частот 100, 200 и 600 МГц диапазона ОВЧ. Параметром каждой кривой является эффективная высота подвеса передающей антенны $h_{1\text{эфф}}$ (м). Ее значения – ряд дискретных чисел: 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600 и 1200 м.

Данные кривые соответствуют значениям медианной напряженности поля, превышаемой в 50 % мест приема и в течение 50, 10 и 1 % времени, соответственно. В нашем случае необходимо выбрать кривые, для которых значения T и L составляют 50 %, как это требуют рекомендации по частотному планированию. Итак, самый первый шаг – это получение числовых данных для зависимости $E_{\text{пер}}(f, h_{1\text{эфф}}, h_2, d, T = 50 \%, L = 50 \%, P_{\text{эим}} = 1 \text{ кВт})$ на основе сведений, представленных в Рекомендации [4]. Кривые получены с учетом среднего высотного строения и средней высоты растительности. Это среднестатистические данные, требующие уточнения для каждого конкретного региона путем проведения соответствующих измерений. На начальном этапе расчета не учитываются особенности рельефа местности, распределение растительности по обслуживаемой территории, влияние возможных препятствий на пути распространения радиоволн, эффекты многолучевости. При указанных допущениях зона покрытия имеет форму круга.

Расчет прогнозируемой медианой напряженности поля для отсутствующих в рекомендации значений $h_{1\text{эфф}}$ и f при $T = 50 \%, L = 50 \%$ выполняется путем интерполяции и экстраполяции данных для имеющихся кривых по методике, приведенной в Рекомендации [4]. Эта процедура подробно описана в данной Рекомендации и не требует дополнительного пояснения.

Заметим, что потери при распространении радиоволн в свободном пространстве зависят также от диэлектрической проницаемости среды ϵ и проводимости почвы σ , значения которых являются функцией частоты f , состава и структуры почвы, температуры и особенностей климата конкретного региона. Эти значения для каждого конкретного региона дает Рекомендация [5].

Формула для расчета прогнозируемой медианной напряженности поля передатчика от расстояния, дБ(мкВ/м) , имеет вид:

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

где $E_{\text{пер}}(f, h_{1\text{эфф}}, h_2, d, T, L, P_{\text{эим}} = 1 \text{ кВт})$ – прогнозируемая медианная напряженность поля, дБ(мкВ/м) , создаваемая передатчиком с эффективной излучаемой мощностью $P_{\text{эим}} = 1 \text{ кВт}$ на расстоянии d (км) с несущей частотой f (МГц) при высотах подвеса передающей и приемной антенн $h_{1\text{эфф}}$ и h_2 (м), соответственно, для времени превышения медианного значения T (50%) и для числа мест в зоне покрытия L (50%); G и A – коэффициенты усиления передающей антенны и затухание в фидере (дБм); $D(\varphi)$ – характеристика направленности антенны, также по мощности (дБ); $P_{\text{кВт}}$ – мощность передатчика в кВт.

Важно, что значения прогнозируемой напряженности поля сигнала передатчика, приведенные в Рекомендации [6], относятся к медианному значению

при условии, что приемная антенна находится на высоте $h_2 = 10 \text{ м}$ над уровнем Земли.

2) Расчет поправок и стандартных отклонений, обусловленных условиями приема и особенностями распространения радиоволн (см. шаг 5 на рисунке 1).

К их числу относятся значения поправок на антропогенный (промышленный) шум, принимаемый антенной приемника $P_{\text{ММН}}$ (дБ), коэффициент местоположения C_l (дБ), потери напряженности поля при уменьшении высоты приемной антенны L_h (дБ), потери при проникновении в здания L_b (дБ). Значения этих поправок приведены в Рекомендации [6] только для трех значений эталонных частот 65, 100 и 200 МГц. Для других значений несущих частот величины этих поправок рассчитывают, используя для каждого из условий приема метод интерполяции или экстраполяции, изложенный в Рекомендациях [4] и [7].

Величины стандартных отклонений напряженности поля от медианных значений в месте приема, такие как: отклонение напряженности поля во времени σ_m (дБ), отклонения при прохождении через строения σ_b (дБ), отклонения на промышленный шум $\sigma_{\text{ММН}}$ (дБ) для системы DRM, приведены в Рекомендации [6] также только для эталонных частот 65, 100 и 200 МГц. Для других значений несущих частот эти величины по-прежнему вычисляются методом экстраполяции или интерполяции по методике, изложенной в Рекомендациях [4] и [7] отдельно для каждого из условий приема.

Расчет суммарного стандартного отклонения напряженности поля $\Delta_{\text{max}}(L, T, f)$ от минимального медианного значения для разных условий приема выполняется согласно [6, 8] по формуле:

$$\Delta_{\text{max}}(L, T, f) = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{\text{ММН}}^2 + \sigma_b^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_m, \sigma_{\text{ММН}}, \sigma_b$ – стандартные отклонения, определяемые для каждого вида поправки из условий приема.

При расчетах считается, что эффективное напряжение радиосигнала на входе радиоприемника $U_{\text{сэфф}}$ имеет логарифмически нормальное распределение и поправочный коэффициент местоположений C_l для системы DRM вычисляется по формуле:

$$C_l = \mu \cdot \Delta_{\text{max}}(L, T, f), \quad (3)$$

где μ – коэффициент распределения для разных условий приема указан в таблице 1; $\Delta_{\text{max}}(L, T, f)$ – суммарное стандартное отклонение напряженности поля в месте приема.

В системах цифрового радиовещания поправочный коэффициент местоположений C_l имеет разное значение в зависимости от условий приема.

Суммарное значение поправок P_{Σ} для каждого из условий приема будет равно их сумме (дБ):

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ММН}} + L_h + L_b + C_l, \quad (4)$$

ТАБЛИЦА 1. Коэффициент распределения μ для разных условий приема [6, 8]TABLE 1. Distribution Factor μ for the different Location Probabilities [6, 8]

Процент местоположений приема L , %	Условия приема	Коэффициент распределения μ
70	фиксированный прием (FX)	0,524
95	на переносные устройства (PO, PI, PO-H, PI-H)	1,645
99	на мобильные устройства (MO)	2,327

3) Расчет минимального уровня напряженности поля сигнала передатчика в точке приема (см. шаг 6 на рисунке 1).

Он определяет минимальное медианное значение напряженности поля сигнала передатчика на границе зоны покрытия, при котором вероятность появления битовой ошибки не превышает $BER = 10^{-4}$; определяется характеристиками приемника, скоростью кода цифровых потоков, а также видом модуляции поднесущих частот радиосигнала DRM-передатчика и условиями приема.

Расчет минимального уровня напряженности поля для высоты приемной антенны, равной 10 м над уровнем моря и для 50 % времени и 50 % мест охвата в зоне покрытия последовательно выполняется согласно [6, 8, 9] по приведенным формулам.

Входная мощность шума приемника $P_{ш.пр}$ (дБВт) определяется как:

$$P_{ш.пр} = F + 10\lg(k \cdot T_0 \cdot B), \quad (5)$$

где $F = 7$ дБ – коэффициент шума приемника (дБ); k – постоянная Больцмана (Дж/К), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$; T_0 – абсолютная температура (К); B – ширина полосы пропускания приемника (Гц), в нашем случае при $B = 100$ кГц и $T_0 = 290$ К имеем $P_{ш.пр} = -146,98$; данный параметр не зависит от характеристик передатчика, определяется только коэффициентом шума приемника и полосой частот радиоканала.

Минимальный уровень мощности полезного сигнала на входе приемника $P_{s,min}$, дБ(Вт) определяется по выражению:

$$P_{s,min} = (C/N)_{min} + P_{ш.пр}, \quad (6)$$

где $(C/N)_{min}$ – минимальное отношение сигнал/шум на входе декодера приемника (дБ), требуемое для получения битовой ошибки на выходе декодера не более чем $BER = 10^{-4}$ (зависит от вида модуляции и скорости кода, т. е. от помехозащищенности цифрового потока).

Минимальная плотность потока мощности (величина вектора Пойнтинга), в месте приема φ_{min} , дБ(Вт/м²), вычисляется в следующем виде:

$$\varphi_{min} = P_{s,min} - A_a + L_f, \quad (7)$$

где L_f – потери в фидере приемника (дБ) зависят от выбранного значения несущей частоты f , а не от вида модуляции и скорости кода; A_a – эффективная апертура антенны (дБм²), при этом:

$$A_a = 10\lg[(1,64/4\pi) \cdot (300/f)^2] + G_0, \quad (8)$$

где f – центральная (несущая) частота радиоканала (МГц); G_0 – усиление антенны относительно полуволнового вибратора (дБ); оба параметра зависят от частоты, но не зависят от вида модуляции и скорости кода.

Требуемый минимальный уровень напряженности поля сигнала передатчика в месте расположения приемной антенны E_{min} , дБ(мкВ/м):

$$E_{min} = \varphi_{min} + 10\lg Z_{\text{св}} [\text{дБ(Ом)}] + 20\lg(1\text{В}/1\text{мкВ}), \quad (9)$$

где $Z_{\text{св}} \approx 120\pi$ – волновое сопротивление в свободном пространстве (Ом); в итоге имеем:

$$E_{min} = \varphi_{min} + 145,8 [\text{дБ(Ом)}],$$

после подстановки имеем:

$$E_{min} = P_{s,min} - 10\lg[(1,64/4\pi) \cdot (300/f)^2] - G_0 + L_f + 145,8. \quad (10)$$

4) Расчет радиуса зоны покрытия DRM-передатчика (см. шаг 7 на рисунке 1).

В Рекомендации [6] требуемый минимальный медианный уровень напряженности поля сигнала передатчика для разных условий приема рассчитывается по приведенным ниже выражениям.

Для фиксированного приема, дБ(мкВ/м):

$$E_{med} = E_{min} + P_{MMN} + C_l. \quad (11)$$

Для портативного наружного и мобильного приемов (дБ(мкВ/м):

$$E_{med} = E_{min} + P_{MMN} + C_l + L_h. \quad (12)$$

Для портативного внутреннего приема:

$$E_{med} = E_{min} + P_{MMN} + C_l + L_h + L_b. \quad (13)$$

На границе зоны покрытия должны одновременно выполняться следующие условия:

$$E_{пер}(d) = E_{med} + \Delta_{max}(L, T, f), \text{ дБ(мкВ/м)}, \quad (14)$$

$$(C/N)_{гр} = (C/N)_{треб}, \text{ дБ},$$

где E_{med} – минимальное медианное значение напряженности поля сигнала передатчика, необходимое для работы приемника при величине битовой ошибки не более, чем $BER = 10^{-4}$; $\Delta_{max}(L, T, f)$ – суммарное стандартное отклонение прогнозируемой напряженности поля сигнала передатчика от минимального медианного значения для несущей частоты f при определенных значениях для процентов мест приема L и времени T , в течение которого это значение превышает; $(C/N)_{гр}$ – отношение сигнал/шум на границе зоны покрытия; $(C/N)_{треб}$ – то же самое, но требуемое стандартом системы DRM.

Величина $(C/N)_{\text{гр}}$ на границе зоны покрытия, как известно, равна [4]:

$$(C/N)_{\text{гр}} = E_{\text{тр}} - (20 \lg (\sqrt{E_{\text{аш}}^2 + E_{\text{иш}}^2 + E_{\text{мс}}^2})), \quad (15)$$

где $E_{\text{аш}}$ и $E_{\text{иш}}$ – напряженности поля атмосферного и промышленного шумов, соответственно; $E_{\text{мс}}$ – напряженность поля помех мешающих станций; $E_{\text{тр}}$ – требуемая напряженность поля сигнала передатчика в месте приема, дБ(мкВ/м), при которой вероятность появления битовой ошибки не превышает 10^{-4} .

Значения промышленного шума приведены в Рекомендации [6], кроме того, они могут быть рассчитаны также в соответствии с Рекомендацией [10], этот расчет также не требует отдельного пояснения. Мощность передатчика (кВт), необходимая для получения зоны покрытия с радиусом r , определяется выражением:

$$P = 10^{B_1/10}, \quad (16)$$

где

$$B_1 = E_{\text{мед}} - E_{\text{пер}}(f, h_{1\text{эфф}}, h_2, d, T, L, P_{\text{эим}} = 1 \text{ кВт}) - 10 \lg G + 10 \lg A - 10 \lg D(\varphi) - \Delta_{\text{max}}(L, T, f), \quad (17)$$

дБ(мкВ/м)

Радиус зоны покрытия r передатчика (км) может быть найден по формуле:

$$r = d_{\text{inf}} \cdot 10^B, \quad (18)$$

где $B = [(E_{\text{пер}}(d) - E_{\text{inf}}) \cdot \lg(d_{\text{sup}}/d_{\text{inf}})] / (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}})$; $E_{\text{пер}}(d)$ – требуемая минимальная напряженность поля сигнала передатчика на границе зоны покрытия с учетом суммарного стандартного отклонения $\Delta_{\text{max}}(L, T, f)$ и поправок на условия приема; E_{sup} и E_{inf} – значения минимальной напряженности поля сигнала передатчика для расстояний d_{sup} и d_{inf} ; d_{sup} и d_{inf} – ближайшие большее и меньшее расстояния.

Этап 3. Коррекция результатов вычислений (шаги 8–10 на рисунке 1)

На этом этапе для каждого выбранного радиального направления строится профиль трассы, и в случае необходимости уточняется эффективная высота подвеса передающей антенны $h_{1\text{эфф}}$. Для построения профиля трассы можно, например, воспользоваться ПО Radio Mobile. При наличии прямой видимости между передающей и приемной антеннами учитывается только фактор прямой видимости. При наличии препятствий на пути распространения радиоволн радиус зоны покрытия уменьшается или появляются малые зоны отсутствия приема внутри общей зоны покрытия, что требует соответствующего увеличения мощности передатчика или, что часто выгоднее, применения дополнительных маломощных передатчиков для обслуживания выявленных *малых зон*. Эта дополнительная коррекция, если это необходимо, выполняется для каждой такой малой зоны и носит в каждом отдельном случае индивидуальный характер.

Заметим также, что в отличие от зоны покрытия, в зоне обслуживания дополнительно должна быть обеспечена возможность приема требуемого числа звуковых программ и сопутствующей им мультимедийной информации с заданным качеством. А это последнее зависит от выбранного режима работы DRM-передатчика. Вид модуляции и скорость кода DRM-передатчика определяют максимально возможную скорость цифрового потока при выбранном режиме работы DRM-передатчика (таблица 3), а это, в свою очередь, однозначно связано с возможным числом и качеством передаваемых программ и сопутствующей им дополнительной мультимедийной информации.

Оценка достоверности изложенного выше метода расчета зоны покрытия

Выполним, опираясь на вышеизложенное, расчет радиуса зоны покрытия DRM-передатчика, работающего на несущей частоте 95,7 МГц при высоте подвеса передающей антенны 278 м над уровнем Земли, затухании фидера 1,575 дБм и усилении передающей антенны 6 дБм, ибо для этого случая имеются данные натурных измерений. Мощность DRM-передатчика примем равной 640 Вт.

В таблице 2 (первые 5 строк) – это значения прогнозируемой медианной напряженности поля при эффективной излучаемой мощности передатчика 1 кВт для несущей частоты 95,7 МГц. Они получены на основе данных Рекомендации [4] для $T = 50\%$ и $L = 50\%$. В двух последних строках таблицы 2 приведены расчетные значения прогнозируемой медианной напряженности поля передатчика мощностью 640 Вт при затухании в фидере 1,575 дБм, усилении передающей антенны 6 дБм для двух значений высоты подвеса приемной антенны над уровнем Земли (10 и 1,5 м) также для $T = L = 50\%$. В Рекомендации [6] уже даны значения минимального уровня напряженности поля на входе приемника, при котором вероятность появления битовой ошибки не превышает значений, требуемых стандартом на систему DRM. Однако они имеются для каждого вида модуляции только для одного значения скорости кода. Заметим, что от вида модуляции и скорости кода зависит значение только одного параметра приемника, $(C/N)_{\text{min}}$.

Очевидно, что для другого значения скорости кода при выбранном виде модуляции это значение может быть найдено как:

$$E_{\text{med2}} = E_{\text{med1}} - (\text{SNR}_1 - \text{SNR}_2), \quad (19)$$

где E_{med1} – минимальная медианная напряженность поля для выбранного вида модуляции и скорости кода при требуемом стандартом отношении сигнал/шум равном SNR_1 ; E_{med2} – то же самое, но для другого значения скорости кода и требуемого стандартом отношении сигнал/шум равном SNR_2 для того же вида модуляции.

ТАБЛИЦА 2. Прогнозируемая медианная напряженность поля сигнала передатчика, дБ(мкВ/м), превышаемая в течение 50 % времени и для 50 % мест приема в зоне покрытия

TABLE 2. Predictable Median Field-Strength Level, dB(μ V/m), Exceeded for 50 % of Time and for 50 % of Locations

Несущая частота, МГц / Эффективная высота передающей антенны, м	Расстояние до передатчика, км								
	1	5	10	20	30	40	50	60	70
Эффективная излучаемая мощность передатчика 1 кВт, высота подвеса приемной антенны 10 м над уровнем Земли									
100 / 300	103	87	79	69,5	62	55	50	45	40,5
100 / 150	100	82,5	74,5	62,5	54	48	42,5	38,5	35
95,7 / 300	102,98	86,98	78,98	69,48	61,98	55	49,98	44,98	40,48
95,7 / 150	99,98	81,98	74,48	62,48	53,98	48	42,48	38,48	34,98
95,7 / 278	102,65	86,43	78,49	68,7	61,1	54,2	49,16	44,27	39,88
Мощность передатчика 640 Вт, затухание в фидере 1,575 дБм, усиление антенны 6 дБм, высота подвеса приемной антенны 10 м над уровнем Земли									
95,7 / 278	105,14	90,92	80,97	71,2	63,6	57	51,64	46,75	42,36
высота подвеса приемной антенны 1,5 м над уровнем Земли									
95,7 / 278	95,34	81,12	71,17	61,4	53,8	47,2	41,8	37	32,56

Минимальные значения отношения сигнал/шум, обеспечивающие получение вероятности появления битовой ошибки, не превышающей 10^{-4} , как это и требуется стандартом, приведены в таблице 3. Они получены экспериментальным путем и позволяют, используя приведенное выше выражение (19) и сведения из Рекомендации [6] (см. таблицы 39–44), найти минимальное значение напряженности поля сигнала передатчика в месте приема для других значений скорости кода, не представленных в данной Рекомендации. И затем, зная для каждого из условий приема значения поправок, по формулам 11–13, рассчитать требуемое минимальное медианное значение напряженности поля сигнала передатчика на границе зоны покрытия. Результаты этих вычислений сведены в таблице 4.

Данные таблицы 4 – это по сути дела полные исходные данные для расчета радиуса зоны покрытия цифрового DRM-передатчика. При этом расчет требуемой мощности передатчика для обеспечения заданного радиуса зоны покрытия может быть выполнен по формулам 16, 17. И наоборот, если же требуется рассчитать радиус зоны покрытия при известных значениях мощности передатчика, потерях в фидере, усилении и характеристики направленности передающей антенны, то он выполняется по формулам 1, 2, 14, 18.

Основные результаты вычислений, необходимые для оценки соответствия результатов расчетов данных измерений, приведены ниже. На рисунке 2 даны результаты вычислений прогнозируемой напряженности поля передатчика с расстоянием: кривая E – медианное значение напряженности поля сиг-

нала передатчика с эффективной излучаемой мощностью 1 кВт при высоте подвеса передающей антенны 278 м для условия стационарного приема (FX, $L = 50 \%$, $T = 50 \%$) при высоте приемной антенны 10 м; кривая E1 – то же самое, но для передатчика мощностью 640 Вт при усилении передающей антенны 6 дБм и потерях в фидере 1,575 дБм (ненаправленное излучение); кривая E3 – для мобильного приема (MO) при $L_h = 9,796$ дБ (таблица 4).

ТАБЛИЦА 3. Значения требуемого SNR для разных режимов модуляции и кодирования в канале MSC в условиях стационарного приема на штыревую антенну в помещении на расстоянии 12 км от телебашни в Санкт-Петербурге, несущая частота DRM-передатчика 95,7 МГц [11]

TABLE 3. Required SNR for Different Modulation and Coding Modes in the MSC Channel, Fixed Reception on a Whip Antenna Indoors at a Distance 12 km from the TV Tower in St. Petersburg, the Carrier Frequency of the DRM Transmitter is 95,7 MHz [11]

Модуляция	Скорость		Требуемое значение SNR, дБ
	Кода	Цифрового потока в канале MSC, кбит/с	
4-QAM	0,250 (PL0)	37,3	2,27
4-QAM	0,333 (PL1)	49,7	2,71
4-QAM	0,400 (PL2)	59,6	2,93
4-QAM	0,500 (PL3)	74,5	4,09
16-QAM	0,330 (PL0)	99,4	7,64
16-QAM	0,411 (PL1)	122,4	9,22
16-QAM	0,500 (PL2)	149,1	10,24
16-QAM	0,625 (PL3)	186,4	11,40

ТАБЛИЦА 4. Требуемый минимальный медианный уровень напряженности поля сигнала передатчика для разных условий приема, видов модуляции поднесущих частот и скоростей кода для несущей частоты 95,7 МГц при вероятности появления битовой ошибки на выходе приемника не более $BER = 10^{-4}$ (система DRM)

TABLE 4. Minimum Median Field-Strength Level for the Different Receiving Scenarios, Modes and Code Rates, the Carrier Frequency of the DRM Transmitter is 95,7 MHz, Average Coded Bit Error Ratio $BER = 10^{-4}$ (bit) (DRM System)

№ п/п	Значения исходных данных		Условия 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 приемной антенны	G_0 , 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 сигнала передатчика на принимающей антенне при модуляции QAM-4 для скорости кода:	E_{min} , дБ(мкВ/м)						
	0,25		2,97	9,799	26,999	9,799	26,999	8,273
	0,33		3,41	10,239	27,439	10,239	27,439	8,713
	0,40		3,63	10,459	27,659	10,459	27,659	8,933
	0,50		4,79	11,619	28,819	11,619	28,819	10,093
5.	Минимальный уровень напряженности поля сигнала передатчика на принимающей антенне при модуляции QAM-16 для скорости кода:	E_{min} , дБ(мкВ/м)						
	0,333		7,409	15,79	32,939	15,79	32,939	13,413
	0,411		8,989	17,37	34,519	17,37	34,519	14,993
	0,50		10,009	18,39	35,539	18,39	35,539	16,013
	0,625		11,169	19,55	36,699	19,55	36,699	17,2977
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_Σ , 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 напряженности поля	$\Delta_{max}(L, T, f)$, дБ	5,897	6,617	4,82	5,897	3,776	5,897
17.	Минимальный медианный уровень напряженности поля сигнала передатчика в месте приема для модуляции QAM-4 при скорости кода:	E_{min} , дБ(мкВ/м)						
	0,25		16,997	50,315	60,621	40,23	50,004	41,742
	0,33		17,437	50,755	61,061	40,673	50,444	42,182
	0,40		17,657	50,975	61,281	40,893	50,664	42,402
	0,5		18,817	52,135	62,441	42,953	51,824	43,562
18.	Минимальный медианный уровень напряженности поля сигнала передатчика в месте приема для модуляции QAM-16 при скорости кода:	E_{min} , дБ(мкВ/м)						
	0,333		21,436	56,306	66,561	46,224	55,944	46,882
	0,411		23,016	57,886	68,141	47,804	57,524	48,462
	0,500		24,036	58,906	69,161	48,824	58,544	49,482
	0,625		25,196	60,066	70,321	49,984	59,704	50,759

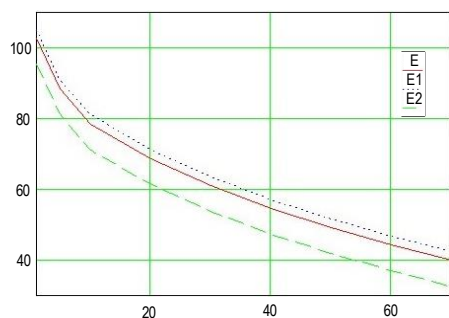


Рис. 2. Кривые изменения прогнозируемой напряженности поля сигнала передатчика с расстоянием

Fig. 2. Curves of the Predicted Field-Strength Level for the Different Distance

На рисунке 3 также демонстрируются полученные расчетным путем зависимости требуемой мощности передатчика от величины радиуса зоны покрытия для мобильного приема (несущая частота – 95,7 МГц, высота подвеса передающей антенны – 278 м) при модуляции QAM-4, скорости кода $R = 0,25$, где верхняя кривая с учетом суммарных стандартных отклонений – $[\Delta_{\max}(L, T, f) = 5,897$ дБ], нижняя кривая без учета суммарных стандартных отклонений – $[\Delta_{\max}(L, T, f) = 0$ дБ].

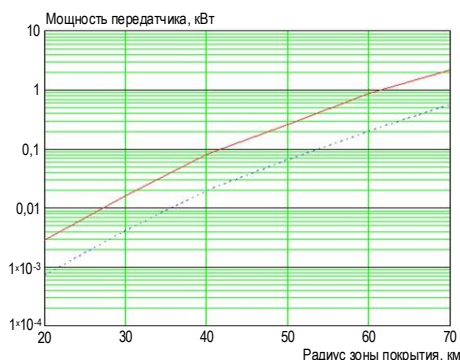


Рис. 3. Кривые требуемой мощности передатчика от величины радиуса зоны покрытия при модуляции QAM-4

Fig. 3. Curves of the Required Transmitter Power for the Different Coverage Radius for 4-QAM Modulation

На рисунке 4 – то же самое, но для модуляции QAM-16 при скорости кода $R = 0,625$ как с учетом, так и без учета возможных суммарных стандартных отклонений. Мощность передатчика здесь отложена в логарифмическом масштабе, а радиус зоны покрытия – в линейном масштабе.

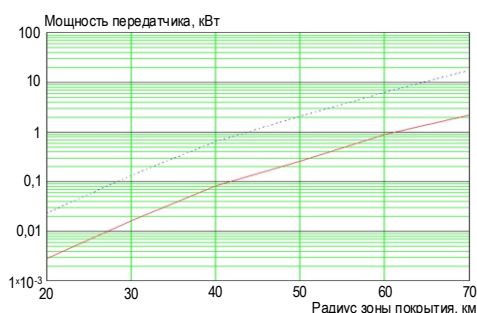
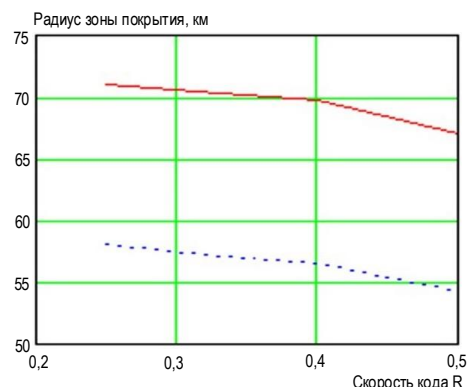


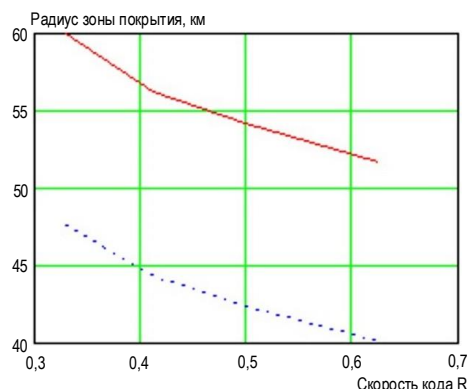
Рис. 4. Кривые требуемой мощности передатчика от величины радиуса зоны покрытия при модуляции QAM-16

Fig. 4. Curves of the Required Transmitter Power for the Different Coverage Radius for 16-QAM Modulation

На рисунке 5 приведены зависимости радиуса зоны покрытия от скорости кода при модуляциях QAM-4 (см. рисунок 5a) и QAM-16 (см. рисунок 5b) (передатчика мощностью 640 Вт) для мобильного приема с учетом суммарных стандартных отклонений (нижняя кривая – $\Delta_{\max}(L, T, f) = 5,895$ дБ) и без их учета (верхняя кривая – $\Delta_{\max}(L, T, f) = 0$ дБ). Масштаб линейный по обеим осям.



a)



b)

Рис. 5. Зависимость радиуса зоны покрытия DRM-передатчика мощностью 640 Вт от скорости кода цифрового потока в канале MSC: а) для модуляции QAM-4; б) для модуляции QAM-16

Fig. 5. 640 W DRM Transmitter Coverage Radius for the different Code Rate in the MSC Channel: а) 4-QAM Modulation; б) 16-QAM Modulation

Натурные измерения для передатчика мощностью 640 Вт при высоте подвеса передающей антенны над уровнем Земли 278 м, усилении антенны 6 дБм, потерях в фидере 1,575 дБм были проведены в условиях мобильного приема. Для измерений в опытной зоне цифрового DRM-радиовещания использовался профессиональный контрольно-измерительный приемник Rfmondial Model RF-SE19 с питанием от бортовой сети автомобиля и четвертьволновой калиброванной антенной типа Kathrein K 51 16 4/510 351 с антенным фактором $K = 7,69$ дБ(1/м). Ослабление сигнала в кабеле, соединяющем антенну и высокочастотный вход приемника, было измерено анализатором ZVL Network Analyzer компании «Rohde & Schwarz» и составило 0,49 дБ на частоте 96 МГц. Несущая частота передатчика составляла 95,7 МГц.

Сравнение прогнозируемых (теоретических) значений и результатов измерений для мобильного приема (мощность DRM-передатчика 640 Вт, усиление антенны 6 дБм, потери в фидере 1,575 дБм, высота подвеса передающей антенны 278 м) представлено в таблице 5 [12–14].

ТАБЛИЦА 5. Сравнение прогнозируемых (рассчитанных) данных и результатов измерений

TABLE 5. Comparison of Predicted (Calculated) and Measurement Results

Вид модуляции, скорость кода	Радиус зоны покрытия, км		
	Результаты расчета без учета / с учетом отклонений*		Результаты измерений (по данным [12–14]) по направлениям
QAM-4, $R = 0,25$	71,3	58	67 – западное 64 – северное
QAM-16, $R = 0,625$	52	40	49 – северное 57 – юго-западное 54 – юго-восточное 64 – восточное

* суммарные стандартные напряженности поля в месте приема

Примечание: расчет выполнен с использованием данных Рекомендаций МСЭ-R P.1546-7 [4], [6] и [7]

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение.

Во-первых, при модуляции QAM-4 и скорости кода $R = 0,25$ максимальный размер радиуса зоны покрытия ограничивается в нашем случае значением оптической видимости. Именно по этой причине для передатчика мощностью 640 Вт при $r_1 = 278$ м и $r_2 = 45$ м (средний подъем рельефа для профиля трассы при удалении от телебашни) максимальное значение радиуса зоны покрытия не должно превышать значение 65...67 км, что хорошо согласуется с данными измерений.

Во-вторых, результаты натурных измерений показали [11], что при мобильном приеме минимальное медианное значение напряженности поля передатчика на границе зоны покрытия составляет около 30 дБ(мкВ/м) при модуляции QAM-4 и $R = 0,25$ (наилучшая помехозащищенность) и около 40 дБ(мкВ/м) при модуляции QAM-16 и $R = 0,625$ (наихудшая помехозащищенность). Эти данные учитывают потери напряженности поля сигнала передатчика с уменьшением высоты подвеса приемной антенны, в нашем случае они составляют для диапазона ОВЧ II (87,5...108 МГц) при мобильном приеме 9,796 дБ (таблица 4). Заметим, что значения требуемой минимальной медианной напряженности поля сигнала передатчика (см. таблицу 4) для разных условий приема учитывают этот факт, а именно, они приведены к условию расположения приемной антенны на высоте 10 м над уровнем Земли, т. к. кривые распространения радиоволн, представленные в [4], получены именно для этого условия.

В-третьих, кроме того, в [6] при расчете требуемой минимальной медианной напряженности поля сигнала передатчика учтены потери на аппаратную реализацию неидеального приемника, они приняты

равными 3 дБ. Контрольно-измерительный приемник Rfmondial Model RF-SE19 по своим характеристикам приближается к идеальному случаю: он имеет предельно достижимые сегодня параметры. Именно по этой причине при сравнении расчетных и экспериментальных данных можно эти потери не учитывать, что приведет при измерениях к несколько большему значению радиуса зоны покрытия. Напомним также, что кривые распространения радиоволн, использованные при проведении вышеизложенных расчетов (Рекомендация [4]), представляют собой среднестатистические данные. Они получены для условий умеренного климата, характерного для Европы и Северной Америки. Кривые для морских трасс были построены на основе данных, полученных главным образом в регионах Северного и Средиземного моря. По этой причине реальные прогнозируемые значения медианной напряженности поля для конкретного региона могут иметь отличия от значений, приведенных в данной Рекомендации. В нашем случае для региона Санкт-Петербурга результаты теоретического расчета, выполненные с их использованием, дают погрешность (см. таблицу 5), не превышающую 10 %, что вполне достаточно для практических целей. Все же для уточнения возможной ошибки в оценке радиуса зоны покрытия полезно предварительно провести измерения реальной напряженности поля сигнала передатчика с расстоянием, сравнить полученные значения с данными Рекомендации [4], что позволит уточнить реальный размер зоны покрытия. Кривые, приведенные в данной Рекомендации, оцифрованы, что удобно для их практического применения.

В-четвертых, для условия мобильного приема при использовании DRM-передатчика мощностью 640 Вт при высоте подвеса передающей антенны 278 м, усилении антенны 6 дБм и потерях в фидере 1,575 дБм:

- при модуляции QAM-4 и скорости кода $R = 0,25$ радиус зоны покрытия с учетом суммарного стандартного отклонения напряженности поля передатчика оставляет около 58 км, что меньше радиуса оптической видимости;

- при модуляции QAM-16 и скорости кода $R = 0,625$ радиус зоны покрытия составляет около 40 км с учетом потерь на аппаратную реализацию и суммарное стандартное отклонение, а без учета этих двух факторов он равен 58 км и также остается меньше радиуса оптической видимости;

- переход от модуляции QAM-4 к модуляции QAM-16 уменьшает радиус зоны покрытия передатчика при мобильном приеме на 10...12 км.

В-пятых, для уточнения возможной ошибки в оценке радиуса зоны покрытия DRM-передатчика для других регионов полезно предварительно провести измерения реальной напряженности поля передатчика с расстоянием, сравнить полученные значения с данными Рекомендации [4], что позволит уточнить реальный размер зоны покрытия.

При этом сам изложенный здесь метод расчета радиуса зоны покрытия не требует изменений.

В-шестых, полученные данные позволяют утверждать, что наиболее предпочтительным является применение модуляции QAM-4 и скорости кода 0,25. В этом случае при равенстве зон покрытия будет иметь место наибольший энергетический выигрыш цифрового DRM-радиовещания по сравнению

с ЧМ-радиовещанием. Однако при этом возможна передача только одной программы с качеством не хуже, чем при ЧМ-радиовещании, но при существенно меньшей полосе частот радиоканала, что несомненно является неоспоримым преимуществом системы DRM. Увеличение числа передаваемых программ требует повышения мощности передатчика при сохранении прежнего размера зоны покрытия, что с энергетической точки зрения не всегда является оправданным.

Список используемых источников

1. Ковалгин Ю.А. Цифровое радиовещание: системы и технологии. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 580 с.
2. Соколов С.А., Мышьянов С.В., Ковалгин Ю.А. Исследование аналого-цифровой DRM/ЧМ-зоны радиовещания в полосе частот 87,5–108 МГц // Электросвязь. 2021. № 4. С. 30–36. DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.003
3. Носов В.И., Сартаков К.И. Оптимизация параметров сети цифрового ТВ-вещания на основе коэффициента использования потенциала передающих станций // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 41–50.
4. Рекомендация МСЭ R P.1546-7 (08/2019) Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц.
5. Рекомендация МСЭ R P.527-6 (09/2021) Электрические характеристики земной поверхности.
6. Рекомендация МСЭ R BS.1660-8 (06/2019) Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ.
7. Рекомендация МСЭ R P.528-3 (02/2012) Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ.
8. Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+') concerning the use in VHF bands I, II and III. V 3.0 – 04/05/2011.
9. Методика частотного планирования радиоэлектронных средств цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-H. Разработана федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт радио». Утверждена решением ГКРЧ от 10 марта 2011 г. (протокол № 11-11-4).
10. Rec. ITU-R P.372-14 (08/2019) Radio nouse.
11. Ковалгин Ю.А., Соколов С.А., Мышьянов С.В., Свинына О.А., Кукшинов А.Е., Сабанова А.И., и др. Разработка рекомендаций по внедрению в Российской Федерации цифрового стандарта радиовещания DRM+: отчет о НИР. СПб.: СПбГУТ, 2015. 169 с.
12. Ковалгин Ю.А., Соколов С.А., Мышьянов С.В., Мошков В.В., Гуминский О.А. Построение опытной аналого-цифровой зоны радиовещания DRM+/УКВ ЧМ в диапазоне 87,5–108 МГц: отчет о НИР. СПб.: Дигитон Системс, 2019. 223 с.
13. Соколов С.А., Мышьянов С.В., Сироткин А.В., Рогинский К.М. Организация мультиплекса медийных сервисов для цифрового радиовещания в стандарте DRM: отчет о НИР. СПб.: Дигитон Системс, 2020. 165 с.
14. Мышьянов С.В. Экспериментальное исследование влияния схем модуляции кодирования на размер зоны обслуживания цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне ОВЧ. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 101–112. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-101-11

* * *

Calculation DRM Station Coverage for Robustness Mode E

Y. Kovalgin¹ , S. Sokolov² 

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Digiton Systems, LLC
St. Petersburg, 191123, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-43-53

Received 17th August 2021

Revised 2nd November 2021

Accepted 8th November 2021

For citation: Kovalgin Y., Sokolov S. Calculation DRM Station Coverage for Robustness Mode E. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(4):43–53. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-43-53

Abstract: A method for calculating a DRM station coverage for the VHF bands is presented, based on the ITU-R P.1546-7 and ITU-R BS.1660-8 recommendations. It is shown that the results of coverage calculations and field measurements confirm the reliability of the suggested method.


Keywords: digital radio broadcasting, DRM system, planning broadcasting network, VHF bands.

References


1. Kovalgin Yu.A. *Digital Broadcasting: Systems and Technologies*. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom Publ.; 2021. 580 p. (in Russ.)
2. Sokolov S.A., Myshyanov S.V., Kovalgin Yu.A. Results of the DRM Simulcast Field Trials in 87.5–108 MHz Band. *Elec-trosvyaz*. 2021;4: 30–36. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.003
3. Nosov V., Sartakov K. Network parameters optimization of digital TV broadcasting on the basis of transmitting station efficiency potential. *Vestnik SibGUTI*. 2016;2:41–50. (in Russ.)
4. Rec. ITU-R P.1546-7 (08/2019). *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*.
5. Rec. ITU-R P.527-6 (09/2021) *Electrical characteristics of the surface of the Earth*.
6. Rec. ITU-R BS.1660-8 (06/2019) *Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band*.
7. Rec. ITU-R P.528-3 (02/2012) *Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands*.
8. *Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+') concerning the use in VHF bands I, II and III*. V 3.0 – 04/05/2011.
9. *Methodology for Frequency Planning of Radio Electronic Means of Digital Television Broadcasting of the DVB-H Standard*. Developed by the Federal State Unitary Enterprise Radio Research Institute. Approved by the decision of the State Commission for Radio Frequencies. 10th March 2011. (in Russ.)
10. Rec. ITU-R P.372-14 (08/2019) *Radio noise*.
11. Kovalgin Yu.A., Sokolov S.A., Myshyanov S.V., Svinina O.A., Kukshinov A.E., Sabanova A.I., et al. *Development of Recommendations for the Implementation of the Digital Radio Broadcasting Standard DRM+ in the Russian Federation. Report on Research Work*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2015. 169 p. (in Russ.)
12. Kovalgin Yu.A., Sokolov S.A., Myshyanov S.V., Moshkov V.V., Guminsky O.A. *Construction of an Experimental Analog-Digital Broadcasting Zone DRM+ / VHF FM in the range of 87,5–108 MHz. Report on Research Work*. St. Petersburg: Digiton Systems Publ.; 2019. 223 p. (in Russ.)
13. Sokolov S.A., Myshyanov S.V., Sirotkin A.V., Roginskiy K.M. *Organization of Multiplex Media Services for Digital Broadcasting in the DRM Standard. Report on Research Work*. St. Petersburg: Digiton Systems Publ.; 2020. 165 p. (in Russ.)
14. Myshyanov S. Experimental Research of Modulation-Coding Schemes Influence on Size of the DRM Digital Radio Broadcasting Service Area in the VHF Band. Part 1. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(3):101–112. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-101-112

Сведения об авторах:

КОВАЛГИН
Юрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, kowalgin@sut.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6753-8062>

СОКОЛОВ
Сергей Анатольевич

генеральный директор ООО «Дигитон Системс», sokoloff@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-3112-6883>