

# Построение границ области покрытия стационарных передатчиков в полосе частот 30 МГц – 4000 МГц

Б. М. Антипин<sup>1</sup>, Е. М. Виноградов<sup>2</sup>

Санкт Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

<sup>1</sup>boris\_antipin@mail.ru, <sup>2</sup>vinog1936@mail.ru

**Аннотация.** Предложен метод получения границ области покрытия стационарных передатчиков сухопутной фиксированной и подвижных служб, рабочие частоты которых лежат в полосе 30 МГц – 4000 МГц. Метод решает задачу определения расстояния от передатчика с известными рабочими параметрами до точки с заданным значением напряженности поля. Может быть использован при решении задач частотно-территориального планирования сетей связи.

**Ключевые слова:** напряженность поля; кривые напряженности; компьютерные таблицы; область покрытия; эффективная высота передающей антенны

## I. ВВЕДЕНИЕ

Понятие «область покрытия» относится к радиопередающим устройствам. Для гражданских радиосредств оно затрагивает, в первую очередь, передатчики радиовещательной службы, предназначенные для передачи населению звука и телевидения, а также передатчики базовых станций, относящиеся к подвижной службе радиосвязи. Наряду с термином «область покрытия» в качестве синонима используется термин «зона покрытия». Определение этого термина представлено в [1] и звучит следующим образом: зона покрытия наземной передающей станции – «это зона, связанная с передающей станцией данной радиослужбы и с определенной частотой, в пределах которой при определенных технических условиях может быть установлена радиосвязь с одной или несколькими приемными станциями». Зона обслуживания совпадает с зоной (областью) покрытия, но включает в себя административные аспекты.

При отсутствии помех со стороны других передатчиков область покрытия ограничена лишь естественным или промышленным шумом. Оценка области покрытия при отсутствии помех со стороны других передатчиков обычно является первым шагом при решении задач частотно-территориального планирования. Область покрытия в условиях существования помех от других передатчиков определяют на этапе оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) между функционирующими и внедряемыми в эксплуатацию средствами.

В настоящей работе рассмотрен метод оценки области покрытия, когда внешние помехи от других радиопередатчиков отсутствуют. Предлагаемая

процедура оценки основана на использовании Рекомендации МСЭ-R P.1546-6 [2]. Рекомендация позволяет оценить значение напряженности поля на выбранном расстоянии от передатчика. Для получения этой оценки в [2] представлены графики напряженности поля в зависимости от расстояния от передатчика при определенных условиях.

Задача определения границ области обслуживания может решаться по-разному. Это зависит от методики, используемой для решения этой задачи. Например, в [3] для определения границ зоны обслуживания телевизионной станции так же используется Рекомендация [2]. При этом оценка границы зоны обслуживания телевизионной станции выполняется путем поиска точек вокруг станции, в которых напряженность электромагнитного поля, создаваемая передатчиком станции, равна требуемой минимальной медианной напряженности поля. После выбора азимутальных направлений, на которых происходит поиск граничных точек, на каждом направлении выбирают с некоторым шагом положение расчетных точек. Далее вычисляют напряженность в выбранных точках и сравнивают со значением, которое определяет границу области. На основании полученных результатов определяют точку границы области на этом направлении. Процедура расчета многократно повторяется на каждом азимутальном направлении. Число расчетных точек может быть значительным и процесс вычислений достаточно трудоемким.

В данной работе указанная Рекомендация используется несколько иначе. Графики кривых напряженности, представленные в [2], приведены для эффективной излучаемой мощности (ЭИМ) передатчика 1 кВт. Они учитывают изменчивость напряженности поля во времени и по местоположению и дают значения напряженности, которое будет превышено в определенном проценте времени и в определенном проценте местоположений. Для компьютерной реализации процедуры оценки напряженности поля, используя кривые напряженности, приведенные в [2], 3-я Исследовательская комиссия МСЭ сформировала компьютерные таблицы, по которым построены графики этой Рекомендации. Использование этих таблиц позволяет решить обратную задачу: найти расстояние от передатчика, на котором имеет место заданная напряженность поля. Поскольку граница области

задается значениями напряженности поля в ее точках, а потери на трассе не зависят от мощности, излучаемой передатчиком, то использование компьютерных таблиц позволяет решить задачу определения границ области покрытия для любой мощности передатчика, а не только той для которой построены таблицы. Именно эта процедура рассматривается ниже. Процедура предполагает выбор азимутальных направлений от передатчика и нахождение расстояния до точек на этих направлениях, в которых будет иметь место желаемая напряженность поля. Соединение смежных точек формирует границу области покрытия. Процедура не требует многократного повторения расчетов на каждом направлении.

## II. ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТОВ

Ниже будем рассматривать только цифровые радиосистемы. Для получения информации о расстоянии от передатчика до границы области покрытия излучением этого передатчика нужно знать потери на трассе передатчик – граница области. Оценку потерь можно получить, если задано значение напряженности поля на границе или известна минимальная мощность сигнала на входе приемника, которая обеспечивает прием сигнала с требуемым качеством (например, требуемое значение BER или FER). Значение мощности сигнала зависит от уровня собственного шума приемника и шумов окружения. Заметим, что рассматривается область покрытия в отсутствие помех от других передатчиков.

Потери на трассе протяженностью  $d$ , км, составляют  $L(d)$ , дБ, где

$$L(d) = P_T - S, \quad (1)$$

здесь  $P_T$  – мощность передатчика, дБВт;  $S$  – мощность сигнала на расстоянии  $d$ , км, от передатчика, дБВт.

Если задана напряженность поля на границе области  $E$ , дБ(мкВ/м), то значение мощности сигнала  $S$ , дБВт, соответствующее этой напряженности дает уравнение

$$S = E + G_R - 20 \lg(f) - 107.2,$$

где  $G_R$  – усиление антенны приемника, дБи,  $f$  – частота сигнала, МГц.

В том случае, когда напряженность поля на границе области покрытия не задана, значение минимальной мощности, необходимой для приема сигнала с требуемым качеством, можно получить исходя из требований, предъявляемых к минимальному значению отношения сигнал/шум, обеспечивающему нужное качество приема сигнала. В зависимости от того, рассматривается ли телевизионный, передатчик, передатчик базовой станции или цифрового радиовещания, определение требуемой мощности сигнала  $S$  на границе области имеет некоторые отличия.

Для получения требуемого качества приема телевизионного сигнала на входе приемника необходимо обеспечить определенное отношение сигнал/шум ( $S/N$ ), дБ, которое в телевидении трактуется как отношение несущая/шум ( $C/N$ ), дБ. Отношение зависит от режима

работы приемника и приемной среды [4]. Мощность сигнала  $S$ , дБВт, в этом случае равна

$$S = (C/N) + N,$$

где  $N$  в общем случае полная мощность собственного шума приемника и шумов окружения, дБВт. Информация о шумах окружения, используемых в задачах телевизионного планирования, содержится, например, в [5, 6].

Для получения требуемого качества приема звуковой и другой информации приемниками сотовой связи необходима мощность сигнала на входе приемника должна быть не меньше, чем мощность, определяемая уравнением

$$S = -204 + 10 \lg(B_R) + NF + (S/N),$$

где  $B_R$  – ширина полосы пропускания приемника, Гц;  $NF$  – коэффициент шума приемника, дБ;  $(S/N)$  – отношение сигнал/шум на входе демодулятора приемника, требуемое для получения нужного качества приема, дБ.

Необходимое отношение  $S/N$  для цифровых приемников зависит от вида модуляции полезного сигнала и скорости кода. Для технологий LTE и NR (5G) теоретическое минимальное  $S/N$ , требуемое на входе демодулятора, представлено в табл. I. На практике необходимое отношение  $S/N$  принимают примерно на 1дБ выше теоретического. Запас связан с несовершенством реализации цифровых алгоритмов и аналого-цифровых преобразователей

ТАБЛИЦА I. ЗАВИСИМОСТЬ  $S/N$  ОТ КОВОЙ СКОРОСТИ И СХЕМЫ МОДУЛЯЦИИ

Модуляция	Кодовая скорость	Отношение $S/N$ , дБ
QPSK	1/8	-5.1
	1/5	-2.9
	1/4	-1.7
	1/3	-1.0
	1/2	2.0
	2/3	4.3
	3/4	5.5
	4/5	6.2
16QAM	1/2	7.9
	2/3	11.3
	3/4	12.2
	4/5	12.8
64QAM	2/3	15.3
	3/4	17.5
	4/5	18.6

Используя полученное значение  $S$  и уравнение (1) находим  $L(d)$ .

Поскольку потери на трассе, выраженные в децибелах, не зависят от мощности передатчика, то переходя к мощности 1 кВт ЭИМ, используемой в [2],

найдем, что напряженность поля, создаваемая таким передатчиком на расстоянии  $d$ , составит

$$E(d) = 139.3 - L(d) + 20 \lg(f), \text{ dB}(\mu\text{V/m})$$

Следующим шагом вычислений является определение значения  $d$ . Для решения данной задачи используем Рекомендацию [2] и компьютерные таблицы кривых, представленных в Рекомендации. Таблицы и графики отображают зависимость напряженности поля от расстояния при определенных условиях. Таблицы и графики дают значения напряженности поля, превышаемые в  $p_L = 50\%$  мест и  $p_r = 50\%$ ,  $10\%$ ,  $1\%$  времени. Здесь же в Рекомендации представлены методы расчета поправок для процентов мест, отличных от  $50\%$ , и процентов времени, которые отличаются от указанных выше, но лежат в интервале от  $1\%$  до  $50\%$ .

Рассмотрим предлагаемую процедуру для значений  $p_L$  и  $p_r$ , для которых представлены таблицы. Если в расчетах используются другие значения  $p_L$  и  $p_r$ , нужна предварительная коррекция используемых ниже значений напряженности поля. В качестве исходных данных помимо частоты  $f$ , для которой определяется область покрытия, выступают также эффективная высота передающей антенны  $h_T$ , м, и вид подстилающей поверхности (сухопутная трасса, трасса над теплым или холодным морем). Процедура включает следующую последовательность операций.

#### 1. $100 \text{ МГц} \leq f \leq 2000 \text{ МГц}$

1.1. Выбирают две соседние частоты, для которых в Рекомендации имеются графики и таблицы, и такие, что исследуемая частота  $f$  удовлетворяют неравенству

$$f_1 < f < f_2$$

Если частота  $f$  совпадает с частотой, для которой построена таблица, то вторую частоту выбирать не надо, и следует использовать таблицу, построенную для этой частоты.

1.2. Для частоты  $f_1$  выбирают таблицу, соответствующую значениям  $p_L$  и  $p_r$  заданным в исходных данных и нужной подстилающей поверхностью. В таблице выделяют два столбца, соответствующих двум соседним высотам антенн  $h_{T1}$  и  $h_{T2}$  таких, что

$$h_{T1} < h_T < h_{T2}$$

Если  $h_T$  совпадает с одной из высот  $h_{T1}$  или  $h_{T2}$ , то вторую высоту выбирать не надо и использовать далее только один столбец.

1.3. В столбце, соответствующем  $h_{T1}$ , находят два последовательных значения напряженности поля  $E_1$  и  $E_2$  такие, что

$$E_2 < E(d) < E_1$$

и отмечают расстояния  $d_1$  и  $d_2$ , которым соответствуют значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$

1.4. Используя линейную интерполяцию между точками  $(d_1, E_1)$  и  $(d_2, E_2)$ , находят (рисунок)

$$\Delta x_1 = \frac{E_1 - E(d)}{E_1 - E_2} (d_2 - d_1) \quad (2)$$

$$\text{и } d_{\min} = d_1 + \Delta x_1$$

1.5. Аналогично, в столбце, соответствующем  $h_{T2}$ , находят два последовательных значения напряженности поля  $E_3$  и  $E_4$  такие, что

$$E_3 < E(d) < E_4$$

и отмечают расстояния  $d_3$  и  $d_4$ , которым соответствуют значения напряженностей  $E_3$  и  $E_4$

1.6. Используя линейную интерполяцию между точками  $(d_3, E_3)$  и  $(d_4, E_4)$  находят

$$\Delta x_2 = \frac{E_3 - E(d)}{E_3 - E_4} (d_4 - d_3) \quad (3)$$

$$\text{и } d_{\max} = d_3 + \Delta x_2$$

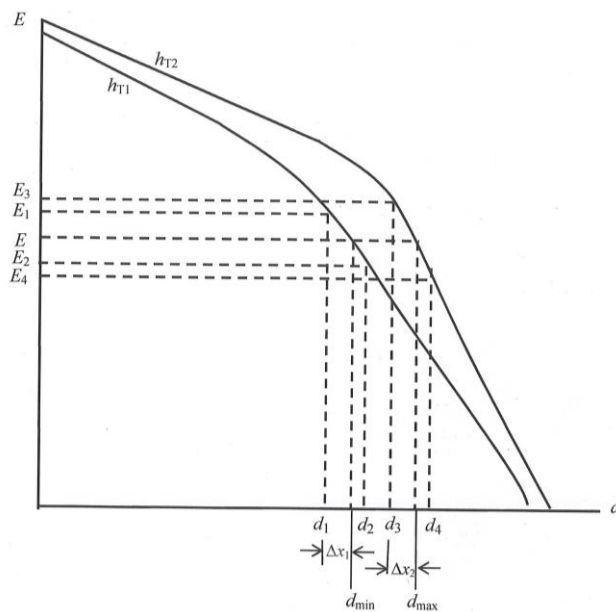


Рис. Интервал  $(d_{\min}, d_{\max})$ , в котором находится искомая дистанция для данной частоты

1.7. Вычисляют расстояние до границы зоны покрытия на частоте  $f_1$

$$d_{f_1} = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min}) \lg(h_T / h_{T1}) / \lg(h_{T2} / h_{T1})$$

1.8. Все операции, выполненные с частотой  $f_1$ , повторяют с частотой  $f_2$  и находят значение расстояния  $d_{f_2}$  до границы зоны покрытия на частоте  $f_2$ .

1.9. Окончательное расстояние  $d$  до границы области покрытия определяют как

$$d = d_{f_1} + (d_{f_2} - d_{f_1}) \lg(f / f_1) / \lg(f_2 / f_1)$$

Для получения значений напряженности поля, используемых для определения расстояния до границы области покрытия на частотах вне рассмотренной полосы, используются методы экстраполяции значений напряженности, представленных в компьютерных таблицах для частот 100 МГц, 600 МГц и 2000 МГц.

2.  $2000 \text{ МГц} < f \leq 4000 \text{ МГц}$

2.1. Выполняют п. 1.2 для частоты  $f$ .

2.2. В таблице для частоты  $f_{\text{sup}} = 2000 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{sup}}$ , ближайшее к  $E(d)$  и такое, что  $E_{\text{sup}} \geq E(d)$ , и расстояние  $d_1$ , на котором имеет место  $E_{\text{sup}}$ .

2.3. В таблице для частоты  $f_{\text{inf}} = 600 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{inf}}$  на расстоянии  $d_1$  от антенны передатчика.

2.4. Вычисляют значение напряженности поля  $E_1$  на частоте  $f$  на расстоянии  $d_1$  для  $h_{T1}$ , используя уравнение

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \lg(f / f_{\text{inf}}) / \lg(f_{\text{sup}} / f_{\text{inf}}) \quad (4)$$

2.5. В таблице для частоты  $f_{\text{sup}} = 2000 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{sup}}$ , ближайшее к  $E(d)$  и такое, что  $E_{\text{sup}} \leq E(d)$ , и расстояние  $d_2$ , на котором имеет место  $E_{\text{sup}}$ .

2.6. В таблице для частоты  $f_{\text{inf}} = 600 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{inf}}$  на расстоянии  $d_2$  от антенны передатчика.

2.7. Используя (4), вычисляют значение напряженности поля  $E_2$  на частоте  $f$  на расстоянии  $d_2$  для  $h_{T1}$

2.8. Используя (2), вычисляют значение  $d_{\text{min}}$ .

2.9. Повторяют п.п. 2.2 – 2.7 для  $h_{T2}$

2.10. Используя (3), вычисляют значение  $d_{\text{max}}$ .

2.11. Вычисляют искомое расстояние  $d$

$$d = d_{\text{min}} + (d_{\text{max}} - d_{\text{min}}) \lg(h_T / h_{T1}) / \lg(h_{T2} / h_{T1}) \quad (5)$$

3.  $30 \text{ МГц} \leq f < 100 \text{ МГц}$

3.1. Выполняют п. 1.2 для частоты  $f$ .

3.2. В таблице для частоты  $f_{\text{inf}} = 100 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{inf}}$ , ближайшее к  $E(d)$  и такое, что  $E_{\text{inf}} \geq E(d)$ , и расстояние  $d_1$ , на котором имеет место  $E_{\text{inf}}$ .

3.3. В таблице для частоты  $f_{\text{sup}} = 600 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{sup}}$  на расстоянии  $d_1$  от антенны передатчика.

3.4. Вычисляют значение напряженности поля  $E_1$  на частоте  $f$  на расстоянии  $d_1$  для  $h_{T1}$ , используя уравнение (4).

3.5. В таблице для частоты  $f_{\text{inf}} = 100 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{inf}}$ , ближайшее к  $E(d)$  и такое, что  $E_{\text{inf}} \leq E(d)$ , и расстояние  $d_2$ , на котором имеет место  $E_{\text{inf}}$ .

3.6. В таблице для частоты  $f_{\text{sup}} = 600 \text{ МГц}$  и столбце для эффективной высоты передающей антенны  $h_{T1}$  находят значение напряженности поля  $E_{\text{sup}}$  на расстоянии  $d_2$  от антенны передатчика.

3.7. Вычисляют значение напряженности поля  $E_2$  на частоте  $f$  на расстоянии  $d_2$  для  $h_{T1}$ , используя уравнение (4).

3.8. Используя (2), вычисляют значение  $d_{\text{min}}$ .

3.9. Повторяют п.п. 3.2 – 3.7 для  $h_{T2}$

3.10. Используя (3), вычисляют значение  $d_{\text{max}}$ .

3.11. Используя (5), определяют значение  $d$ .

Описанную процедуру повторяют на всех выбранных азимутальных направлениях. Соединяя соседние точки, расположенные на каждом азимутальном направлении на границе зоны, получают область покрытия.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод определения расстояния от передатчика до точки с заданным значением напряженности поля, создаваемой этим передатчиком. Метод использует компьютерные таблицы кривых, представленных в [2]. Может применяться для определения областей покрытия и зон обслуживания стационарных передатчиков при решении задач частотно-территориального планирования сетей связи, а также для установления перекрытия областей покрытия разных передатчиков и необходимости анализа помех радиоприему в перекрывающихся областях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Регламент радиосвязи, ИТУ, 2020
- [2] Рекомендация МСЭ-R Р.1546-6 Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц.
- [3] Методика определения зоны обслуживания одночастотной сети передающих станций наземного цифрового ТВ-вещания стандарта DVB-T2. Приложение 2 к решению ГКРЧ от 16 октября 2015 г. №15-35-04.
- [4] Report ITU-R BT.2254-5 Frequency and network planning aspects of DVB-T2
- [5] Report ITU-R BT.2265-1 Guidelines for the assessment of interference into the broadcasting service
- [6] Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference (RRC-6) ITU, Geneva, 15 May – 16 June 2006