Научная статья УДК 621.396.75 DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-72-79 CC BY 4.0

Методика расчета радиуса зоны электромагнитной доступности источника поверхностных волн с заданной плотностью спектра изотропно излучаемого сигнала

- **© Олег Вениаминович Попов**¹, ov.popov@mail.ru
- 💿 Андрей Витальевич Тумашов², ice47reg@yandex.ru
- **Беоргий Николаевич Борисов**¹, georgiiborisov@gmail.com
- **© Константин Олегович Коровин**² ⊠, konstkor@mail.ru

¹000 «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, 195220, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Актуальность. Планирование ВЧ-радиосвязи поверхностными волнами в конечном счете состоит в определении соотношения сигнал/шум на входах приемников каждой радиолинии. Если это соотношение выше минимально допустимого, делается вывод о возможности функционирования анализируемой радиолинии в системе радиосвязи. Можно ожидать, что процесс планирования существенно упростится, если для каждой радиостанции определять радиус зоны электромагнитной доступности (РЗЭМД) по поверхностной волне. Таким образом, задача разработки методики инженерного расчета РЗЭМД является актуальной и практически важной. Цель. Создание методики оценки для инженерных расчетов РЗЭМД источника поверхностных волн с заданной плотностью спектра изотропно излучаемого сигнала. Результаты. Разработана методика расчета РЗЭМД. Предложен общий подход к определению предельной длины радиолиний поверхностных волн, основанный на введении понятия «технический фактор радиолинии». Практическая значимость. Построены номограммы для определения РЗЭМД. Предложена аппроксимация зависимости максимальной температуры внешних шумов от частоты в ВЧ-диапазоне аналитическим выражением. Разработана и представлена в виде графика частотная зависимость температурного коэффициента входа антенны ШТ4Н81. Показана возможность применения предлагаемой методики для решения практических задач на примере расчета РЗЭМД радиостанции TTR-2101М для моноимпульсного пеленгатора с кольцевой антенной решеткой из восьми элементов типа ШТ4Н81.

Ключевые слова: радиус зоны электромагнитной доступности, кольцевая антенная решетка, множитель ослабления трассы, температурный коэффициент входа антенны, технический фактор

Ссылка для цитирования: Попов О.В., Тумашов А.В., Борисов Г.Н., Коровин К.О. Методика расчета радиуса зоны электромагнитной доступности источника поверхностных волн с заданной плотностью спектра изотропно излучаемого сигнала // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 72–79. DOI:10.31854/ 1813-324X-2022-8-3-72-79

Method for Calculating the Radius of an Electromagnetic Availability Zone based on a Surface Wave Source with a Given Spectrum Density of an Isotropically Emitted Signal

- **Oleg Popov**¹, ov.popov@mail.ru
- Andrey Tumashov², ice47reg@yandex.ru
- Georgy Borisov¹, georgiiborisov@gmail.com
- **© Konstantin Korovin**² ⊠, konstkor@mail.ru

¹JSC Spetsialnyi Tekhnologicheskii TSentr,

- St. Petersburg, 195220, Russian Federation
- ²The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
- St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: Thematic justification. When planning HF radio communication using surface waves, it is necessary to determine the signal-to-noise ratio at the inputs of each radio link receiver. Given a sufficiently high ratio, a conclusion can be drawn concerning the effective functionality of the analyzed radio link in a radio communication system. The planning process will be significantly simplified if the radius of the electromagnetic availability zone (REAZ) can be defined for surface waves at each radio station. Thus, the task of developing a methodology for engineering calculation of REAZ is relevant and practically important. Goal. To develop an estimating technique for engineering calculations of a REAZ based on a surface wave source with a given isotropically emitted signal spectrum density. **Results.** A technique for calculation of the radius of the electromagnetic accessibility zone was developed. A general approach for determining the limiting length of radio links of surface waves is proposed, based on the introduced "technical factor of a radio link" concept. **Practical implications.** Nomograms for determining the radius of an electromagnetic accessibility zone were constructed. The dependence of the maximum temperature of external noise on frequency in the HF range can be approximated using an analytical expression. The developed frequency dependence of the temperature coefficient of the input of an ShT4N81 antenna is presented in a graphical form. The feasibility of using the proposed technique for solving practical problems is demonstrated on the example of calculating the radius of the electromagnetic accessibility zone of a TTR-2101M radio station for a monopulse direction finder with a ring antenna array consisting of eight elements of the ShT4N81 type.

Keywords: radius of the electromagnetic availablity zone, ring antenna array, path attenuation factor, temperature coefficient of antenna input, technical factor

For citation: Popov O., Tumashov A., Borisov G., Korovin K. Method for Calculating the Radius of an Electromagnetic Availability Zone based on a Surface Wave Source with a Given Spectrum Density of an Isotropically Emitted Signal. *Proc. of Telecom. Universities.* 2022;8(3):72–79. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-72-79

Введение

Поверхностные волны широко используются в ВЧ-диапазоне для связи на небольшие расстояния (до нескольких десятков километров). Это объясняется высокой стабильностью условий распространения на трассах поверхностных волн, а также сложностью перехвата передаваемых по ним сообщений, ввиду малого радиуса зоны электромагнитной доступности (РЗЭМД). Однако при этом расчет РЗЭМД становится весьма важной задачей как при планировании самой радиосвязи, так и мероприятий по обнаружению факта ее существования.

Отправной точкой для расчета РЗЭМД является минимальное отношение сигнал/шум на входе приемника, при котором он функционирует с заданным качеством. Определить уровень сигнала на входе приемника можно, воспользовавшись полученным В.А. Фоком [1] решением задачи о дифракции радиоволн вокруг гладкой сферической поверхности. Найденный в результате решения этой задачи множитель ослабления трассы позволяет представить мощность сигнала на входе приемника, как функцию его удаления от источника поверхностных волн [2, 3].

При отсутствии преднамеренных помех уровень шумов на входе приемника не зависит от его местоположения, следовательно, отношение сигнал/шум будет уменьшаться по мере удлинения трассы, т. е. совместно с уменьшением уровня сигнала. Расстояние, на котором отношение сигнал/шум уменьшится до минимально допустимого значения, и будет РЗЭМД заданного источника для заданного приемника. Таким образом, расчет РЗЭМД целесообразно начать с определения суммарной мощности шумов, пересчитанных ко входу приемника.

Мощность шумов на входе приемника ВЧ-диапазона

Как известно [2], мощность шумов на входе приемника определяется выражением:

$$P_{\rm III} = k_{\rm B} T_{\rm III} \Delta f, \qquad (1)$$

Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3

где $K_{\rm B} = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{{\rm Br}}{{}_{\rm град} \cdot {}_{\rm \Gamma}{\rm I}} \right]$ – постоянная Больцмана; Δf [Гц] – полоса пропускания приемника; $T_{\rm III}$ [K] – эффективная шумовая температура на входе приемника.

Эффективную шумовую температуру на входе приемника можно представить в виде суммы температуры внешних шумов, шумов антеннофидерного тракта и приемника [2]:

$$T_{\rm III} = \eta T_a + (1 - \eta) T_0 + T_{\rm np} \,, \tag{2}$$

где T_a – суммарная температура всех внешних шумов на входе антенны; $T_0 = 290 \ K$ – стандартная температура; $T_{\rm np}$ – температура шумов приемника, пересчитанных к его входу; $\eta = \eta_{\phi}\eta_a\eta_c$ – коэффициент полезного действия (КПД) антеннофидерного тракта (АФТ); η_a – КПД антенны; η_{ϕ} – КПД фидера; η_c – коэффициент согласования по сопротивлению антенны с фидером, подключенным к приемнику:

$$\eta_{\rm c} = \frac{4R_a R_{\rm np}}{\left|Z_a + R_{\rm np}\right|^2},\tag{3}$$

где $Z_a = R_a + X_a$ – входное сопротивление антенны; $R_{\rm np}$ – входное сопротивление фидера с подключенным к нему идеально согласованным приемником.

Выражение (2) удобно преобразовать к виду:

$$T_{\rm III} = \eta T_{\rm ap} \,, \tag{4}$$

где T_{a} – эффективная шумовая температура антенны (суммарная температура шумов на входе антенны):

$$T_{a9} = T_a + \frac{(1 - \eta)T_0 + T_{np}}{\eta}.$$
 (5)

Входящая в (5) температура шумов на входе приемника определяется выражением:

$$T_{\rm np} = (N - 1)T_0 \,, \tag{6}$$

где N – коэффициент шума приемника.

Максимальная температура внешних шумов антенны, как следует из графиков [4], является функцией частоты и в ВЧ-диапазоне изменяется от 3×10^{11} [K] (на частоте 1,5 МГц) до 3×10^{4} [K] (на частоте 30 МГц).

Для численного моделирования эту зависимость удобно представить в аналитическом виде:

$$T_a = 10^{0.867 \cdot \log^2(f) - 6.54 \cdot \log(f) + 12.31},\tag{7}$$

где *f* – частота, выраженная в мегагерцах.

Как следует из соотношения (5), эффективная шумовая температура зависит не только от температуры внешних шумов, но и от КПД антеннофидерного тракта, который в ВЧ-диапазоне изменяется в весьма широких пределах. В силу этого обстоятельства, эффективную шумовую температуру в дальнейшем анализе удобно представить в виде произведения:

$$T_{a9} = T_a K_t^2, \tag{8}$$

где *К*_t – температурный коэффициент входа антенны (ТКВА).

Как следует из выражений (5, 6 и 8), ТКВА определяется следующим образом:

$$K_t = \sqrt{\frac{T_{a3}}{T_a}} = \sqrt{1 + \frac{NT_0}{\eta T_a}}.$$
(9)

Видно, что ТКВА является интегральным параметром, поскольку зависит от КПД антеннофидерной системы, коэффициента шума приемника и температуры внешних шумов.

Поскольку в ВЧ-диапазоне температура внешних шумов, как указано выше, не менее 3×10^4 [K], из выражения (9) следует, что антенные системы с высоким КПД АФТ ($\eta \ge 0,1$) имеют ТКВА во всем ВЧ-диапазоне, близкий к единице. Однако реальный КПД антенн, предназначенный для работы поверхностной волной, в большей части ВЧдиапазона существенно ниже. Поэтому, точный расчет ТКВА представляет собой отдельную задачу и в рамках данной работы не рассматривается.

На рисунке 1 представлен ТКВА типового несимметричного вибратора с вынесенной точкой питания ШТ4Н81 при развертывании на сухой и влажной почвах. Коэффициент шума приемника принимался в расчетах равным 10. Видно, что на частотах ниже 6 МГц ТКВА можно считать равным единице.



Fig. 1 Antenna Input Temperature Coefficient for ShT4N81 for Deployment on Dry and Moist Soil for N = 10

Принимая во внимание (4 и 8), суммарная мощность шумов на входе приемника, определяемая выражением (1), будет:

$$P_{\rm III} = k_{\rm E} \Delta f \eta T_a K_t \,. \tag{10}$$

Таким образом, введение в рассмотрение слабо зависящего от частоты интегрального параметра ТКВА позволило выделить КПД антенной системы в выражении для мощности шума на входе приемника в виде самостоятельного сомножителя.

Отношение сигнал/шум на входе приемника поверхностных волн как функция расстояния от источника

Как известно [2, 3], мощность сигнала на входе приемника определяется соотношением:

$$P_c = \Pi \cdot A \cdot \eta_c \cdot \eta_{\phi} , \qquad (11)$$

где П = $\frac{|\overline{E_c}|^2}{120\pi}$ – модуль вектора Пойнтинга; $\overline{E_c}$ – вектор напряженности поля сигнала; A – эффективная площадь антенны, под которой, по определению [5], понимается площадь фронта плоской волны, вся мощность с которой передается в идеально согласованную нагрузку.

В свою очередь, модуль напряженности поля сигнала связан с изотропно излучаемой мощностью источника следующим образом [5, 7]:

$$\left|\overline{E_c}\right| = \frac{\sqrt{30P_{uu}}}{r} \left|V\right|,\tag{12}$$

где $P_{uu} = P_1 G_1$ – изотропно излучаемая мощность источника поля; P_1 – мощность, подводимая к передающей антенне; G_1 – коэффициент усиления передающей антенны; |V| – модуль множителя ослабления трассы; r – расстояние между приемной и передающей антеннами (длина трассы).

Выражение (12) позволяет представить модуль вектора Пойнтинга в виде:

$$\Pi = \frac{P_{uu}}{4\pi r^2} |V|^2.$$
(13)

Эффективная площадь антенны связана с коэффициентом усиления соотношением:

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi},\tag{14}$$

где λ – длина волны; *G* – коэффициент усиления антенны.

В свою очередь коэффициент усиления антенны определяется с помощью выражения:

$$G = D\eta_a , \qquad (15)$$

где *D* – коэффициент направленного действия антенны (КНД).

Выражения (10, 11, 13 и 14) позволяют представить отношение мощности сигнала на входе приемника к мощности шума следующим образом:

$$q^{2} = \frac{P_{c}}{P_{\rm III}} = P_{uu}^{c} D \left(\frac{\lambda |V|}{4\pi r}\right)^{2} \frac{1}{k_{\rm B} T_{0} K_{t}^{2}} \frac{T_{0}}{T_{a}}, \qquad (16)$$

где $q = \frac{U_c}{U_{\rm m}}; U_c$ – действующее значение напряжения сигнала; $U_{\rm m}$ – действующее значение напря-

жения шума; *P*^c_{uu} – плотность спектра изотропно излучаемой мощности:

$$P_{uu}^c = \frac{P_{uu}}{\Delta f}.$$
 (17)

Как и следовало ожидать, с увеличением расстояния до источника поверхностных волн отношение сигнал/шум на входе приемника уменьшается, поскольку уменьшается сомножитель, стоящий в круглых скобках. Следовательно, предельной длиной радиолинии поверхностных волн будет расстояние, на котором отношение сигнал/шум опустится до минимально допустимого значения.

Методика расчета РЗЭМД источников поверхностных волн

Обычно под зоной электромагнитной доступности понимается область, в пределах которой источник с заданной плотностью спектра изотропно излучаемой мощности создает на входе приемника сигнал, достаточный для работы с заданным качеством. Тогда РЗЭМД есть предельная длина радиолинии поверхностных волн для выбранных источника сигнала и приемника на выбранной частоте.

Пусть q_{\min} – минимальное отношение сигнал/ шум, при котором обеспечивается работа радиоприемного устройства с заданной точностью и достоверностью.

Тогда РЗЭМД источника поверхностной волны можно определить из соотношения (16), преобразовав его в уравнение относительно *r*_{max}:

$$\frac{\lambda |V|}{4\pi r_{\max}\sqrt{k_{\rm B}T_0}} = q_{\min} \sqrt{\frac{T_a}{T_0}} R_{\rm T\varphi} \,, \tag{18}$$

где $R_{r\phi}$ – технический фактор радиолинии, учитывающий параметры источника поверхностных волн и приемного устройства; $R^0_{r\phi} = (P^c_{uu}D)^{-1/2}$ – технический фактор радиолинии при идеальном приемном тракте:

$$R_{\tau\phi} = K_t (P_{uu}^c D)^{-1/2} = K_t R_{\tau\phi}^0.$$
 (19)

Под идеальным приемным трактом понимается согласованная линия передачи, составленная из элементов без потерь, т. е. фидер, у которого $\eta = 1$. При этом, как следует из соотношения (9), $K_t = 1$, т. к. в ВЧ-диапазоне $(NT_0)/T_a \ll 1$ [4].

Наибольшие вычислительные трудности при решении уравнения (18) вызывает определение модуля множителя ослабления трассы |V|, величина которого находится из решения задачи о дифракции радиоволн на полупроводящей сфере большого радиуса.

Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3

Если приемная и передающая антенны находятся непосредственно на поверхности этой сферы, то модуль множителя ослабления трассы будет [3, 5]:

$$|V| = 2\sqrt{\pi z} \left| \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{izt_s}}{t_s + q^2} \right|, \qquad (20)$$

где

$$z = r_{\max} \sqrt[3]{\frac{\pi}{\lambda a^2}},$$
 (21)

$$q = i \sqrt[3]{\frac{\pi a}{\lambda}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon + i60\sigma\lambda}},$$
 (22)

где є – относительная диэлектрическая проницаемость почвы; σ [См/м] – удельная проводимость почвы; $a = 6,37 \cdot 10^6$ [м] – радиус земли; t_s – корни характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение, определяющее значения t_s , имеет вид:

$$w_2'(t) - qw_2(t) = 0, (23)$$

где $w_2(t)$ – функция Эйри второго рода, являющаяся одним из решений дифференциального уравнения Эйри; $w'_2(t)$ – производная от функции Эйри второго рода по полному аргументу.

Функция $w_2(t)$ связана с функцией Ханкеля второго рода порядка одной трети соотношением:

$$w_2(t) = \sqrt{\frac{\pi t}{3}} e^{-\frac{i2\pi}{3}} H_{\frac{1}{3}}^{(2)} \left(\frac{2}{3}t^{\frac{3}{2}}\right).$$
(24)

Значения первых пяти корней характеристического уравнения для двух предельных значений параметра q ($q = \infty$ и q = 0) приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Первые пять корней характеристического уравнения

TABLE 1. The First Five Roots of Eigenvalue Equation

S		1	2	3	4	5	
$t_s^\infty e^{-i\frac{2\pi}{3}}$	$q = \infty$	2,338	4,088	5,521	6,787	7,994	
$t_{s}^{0}e^{-i\frac{2\pi}{3}}$	q = 0	1,019	3,248	4,820	6,163	7,372	

Все последующие корни с достаточной для практики точностью могут быть вычислены по формулам:

$$t_s^{\infty} = \left[\frac{3}{2}\left(s - \frac{1}{4}\right)\pi\right]^{2/3} e^{i2\pi/3},$$
 (25)

$$t_s^0 = \left[\frac{3}{2}\left(s - \frac{3}{4}\right)\pi\right]^{2/3}e^{i2\pi/3}.$$
 (26)

Для промежуточных значений параметра *q* корни *t*_s вычисляются в соответствии с выражением:

$$\begin{array}{l} t_{s}; \ t_{s}^{0} + \frac{q}{t_{s}^{0}} \ \text{ при } |q| \sqrt{t_{s}} < 1 \\ t_{s}; \ t_{s}^{\infty} + \frac{1}{q} \ \text{ при } |q| \sqrt{t_{s}} > 1 \end{array} \right\}.$$
 (27)

Вычисления по формулам (20–27) позволяют представить левую часть уравнения (18) в графическом виде. На рисунке 2 изображено семейство кривых, описывающих зависимость левой части этого уравнения от протяженности радиолинии, при заданной длине волны (сплошные линии) λ .





Рис. 2. Номограммы для определения РЗЭМД для сухой (а) и влажной (b) почвы

Fig. 2. Nomograms for Determination of Radius of the Electromagnetic Accessibility Zone: a) for Dry soil b) for Moist Soil

На каждой кривой, характеризуемой определенной длиной волны, зафиксированы точки, соответствующие значениям правой части уравнения (18) при заданном техническом факторе. Соединением точек с одинаковым техническим фактором получено второе семейство кривых (пунктирные линии), образующее совместно с первым криволинейную координатную сетку, точки которой определяются длиной волны и техническим фактором. Поскольку при этом каждой точке, лежащей в пределах координатной сетки, соответствует длина радиолинии, представленные семейства кривых могут использоваться в качестве номограмм для определения РЗЭМД при сухой и влажной почвах по заданной частоте (длине волны) и вычисленном техническом факторе.

Таким образом, задача определения РЗЭМД свелась к определению технического фактора радиолинии «источник поля» – «приемное устройство». Как видно из (18), технический фактор представляет собой произведение двух сомножителей, один из которых $R^0_{\rm T\phi}$. Его значение полностью определяется шириной спектра сигнала, изотропно излучаемой мощностью и направленностью приемной антенны. Все эти величины являются паспортными данными, вследствие чего вычисление $R^0_{\rm T\phi}$ не вызывает серьезных затруднений. Более сложным является определение второго сомножителя технического фактора – ТКВА. Этот параметр зависит, как следует из (10), от КПД АФТ.

Для определения КПД АФТ требуется построить подробную математическую модель антенны с системой противовесов или заземления, поскольку эти системы являются неотъемлемой частью антенн поверхностных волн. Актуальность решения такой задачи обусловлена тем, что современные программные комплексы, такие как Ansys HFSS, Altair FEKO, CST MWS и другие, во-первых, не применимы к антеннам, размещаемым сразу в двух средах, а во-вторых, не разделяют активную составляющую входного сопротивления антенны на сопротивление потерь и сопротивление излучения.

В работе [6] изложена методика расчета сопротивления потерь заземленных несимметричных вибраторов с вынесенной точкой питания и получены необходимые аналитические выражения. Считая, что распределение тока вдоль проводников такого вибратора совпадает с распределением в нагруженной однородной линии без потерь, можно определить его входное сопротивление, КПД АФТ, и, в конечном итоге, ТКВА.

Поскольку все антенны, предназначенные для работы поверхностными волнами, конструируются как несимметричные системы, в которых один из зажимов заземляется, т. е. подключается к противовесу или заземлению, методику [6] можно использовать для определения ТКВА всех типов антенн, пригодных для работы поверхностными волнами.

Таким образом, считая, что ТКВА и КНД приемной антенны известны, методику расчета РЗЭМД можно представить состоящей из двух этапов:

 по известным КНД и ТКВА приемного устройства, а также заданной плотности спектра изотропно излучаемой мощности, с помощью соотношения (19) определяется технический фактор радиолинии;

 по заданной частоте (длине волны) и вычисленному техническому фактору, пользуясь номограммой (см. рисунок 2) с характеристиками почвы, на которой развернута приемная антенна, определяется РЗЭМД.

Расчет РЗЭМД радиостанции TTR-2101М для пеленгатора «Торн-8ПМК»

В качестве примера рассмотрим решение задачи по определению РЗЭМД радиостанции TTR-2101M для пеленгатора «Торн-8ПМК».

Исходные данные

Характеристики источника поверхностных волн (радиостанция TTR-2101М):

– ширина спектра сигнала (Δf): 3 КГц;

– изотропно излучаемая мощность (*P*_{uu}): 150 Вт;

– диапазон рабочих частот (1,5–30) МГц.

Характеристики приемного устройства (пеленгатор моноимпульсный «Торн-8ПМК»):

- коэффициент шума приемника (N): 10;

– антенная система: восьмиэлементная КАР с радиусом 25 м (развернутая на влажной почве);

 – антенные элементы: несимметричные вибраторы типа ШТ4Н81.

Ограничения и допущения

Потери в элементах фидерного тракта КАР пренебрежимо малы по сравнению с потерями в антенных элементах и потерях на рассогласование.

Предварительные расчеты

1) Вычисление плотности спектра изотропно излучаемой мощности.

В соответствии с (17) получим:

$$P_{uu}^{c} = \frac{P_{uu}}{\Delta f} = \frac{150}{3 \cdot 10^{3}} = 0.05 \left[\frac{\mathrm{Bt}}{\mathrm{\Gamma u}}\right]$$

2) Вычисление ТКВА приемной антенной системы.

ТКВА КАР с учетом сделанного допущения равен ТКВА антенного элемента, т.е. его зависимость от частоты представлена на рисунке 1b сплошной линией.

3) Вычисление КНД приемной антенной системы.

Анализ КНД восьмиэлементной КАР с радиусом 25 м, выполненный по методике, изложенной в [7], показал, что под малыми углами к горизонту значения КНД может определяется соотношением:

$$D_{a,6} = \begin{cases} 3 & \text{при } R/\lambda \le 0.09 \\ \frac{4\pi^2 R}{\lambda} & \text{при } 0.09 \le R/\lambda \le 0.52. \\ 20,5 & \text{при } R/\lambda \ge 0.52 \end{cases}$$
(28)

Вычисление технического фактора

Соотношение (18) совместно с (28), вычисленным значением P_{uu}^c , и значениями ТКВА, полученными из графика на рисунке 1b, позволяет определить технический фактор радиолинии «пеленгатор» – «радиостанция» во всем рабочем диапазоне TTR-2101M. Промежуточные результаты вычислений и значения технического фактора $R_{\tau\phi}$ представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Значения технического фактора радиолинии «Торн-8ПМК» – «ТТR-2101М» и промежуточных параметров

F[Мц] Параметры	1,5	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
D	4,9	9,9	19,7	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
$P^0_{ au \phi}$	2,02	1,42	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,93	0,99	0,99
K _t	1	1	1,1	1,2	1,4	1,65	1,9	2,15	2,35	2,5	2,7
$R_{\tau\phi}$	2,02	1,42	1,11	1,19	1,39	1,63	1,88	2,13	2,33	2,48	2,67

TABLE 2. Values of "Torn-8PMK" – TTR-2101M Radio Link Technical Factor

Расчет РЗЭМД

Определение РЗЭМД производится с помощью номограммы, построенной для влажной почвы (см. рисунок 2b). Порядок пользования номограммой следующий:

 на криволинейной координатной сетке находится точка, соответствующая заданной частоте и техническому фактору радиолинии;

 от этой точки опускается нормаль на нижнюю горизонтальную шкалу, с которой считывается значение РЗЭМД.

На рисунке 3 линиями со стрелками показана последовательность определения РЗЭМД на частоте 6 МГц.



Рис. 3. Порядок определения РЗЭМД на частоте 6 МГц Fig. 3. The Way of Determination of the Radius of the Electromagnetic Accessibility Zone at 6MHz Frequency

Результаты вычисления РЗЭМД радиостанции TTR-2101M для пеленгатора «Торн-8ПМК» представлены на рисунке 4. Видно, что максимальный РЗЭМД обеспечивается на частотах порядка 6 МГц. Уменьшение РЗЭМД при дальнейшем снижении частоты объясняется уменьшением как направленных свойств приемной КАР, так и ее КПД за счет уменьшения согласования по сопротивлению. Полученные результаты хорошо согласуются с опытом практического применения поверхностных волн [2, 3, 8, 9], рекомендующего использовать этот механизм распространения на частотах не выше 10–15 МГц.



Рис. 4. Зависимость РЗЭМД радиостанции TTR-2101М для пеленгатора «Торн-8ПМК» от частоты

Fig. 4. The Dependence of Radius of the Electromagnetic Accessibility Zone for Radio Station TTR-2101M for "Torn-8PMK" Direction Finder

Заключение

В работе были построены номограммы для определения РЗЭМД, позволяющие при известных параметрах паспортных данных изделия оценить возможности работы. Предложенная формула аппроксимации зависимости максимальной температуры внешних шумов от частоты в ВЧ диапазоне может применяться для определения реальной чувствительности пеленгатора.

Разработанная методика определения РЗЭМД отличается простотой, пригодна для инженерных расчетов и может использоваться как при планировании системы радиосвязи поверхностными волнами, так и мероприятий по ее контролю.

В качестве примера рассмотрено использование предлагаемой методики на примере расчета РЗЭМД радиостанции иностранных армий TTR-2101М для моноимпульсного пеленгатора с КАР из восьми элементов типа ШТ4Н81.

В отличие от существующих модельных методик, имеющих ряд ограничений и рассчитанных на использование в диапазонах ОВЧ и УВЧ [10], предложенная методика является более универсальной и предназначена для использования в ВЧдиапазоне.

Список источников

- 1. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Советское радио, 1970. 518 с.
- 2. Гавеля Н.П., Истрашкин А.Д., Муравьев Ю.К., Серков В.П. Антенны. Ч. 1. Л.: ВАС, 1963. 633 с.
- 3. Серков В.П. Распространение радиоволн и антенные устройства. Л.: ВАС, 1981.
- 4. Рекомендация MCЭ-R P.372-16 (08/2022) Радиошум.
- 5. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971.

6. Попов О.В., Тумашов А.В., Борисов Г.Н. Методика расчета сопротивления потерь заземленных несимметричных вибраторов с вынесенной точкой питания // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 4. С. 71–79. DOI:10.18127/j20700784-202104-10

7. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн. Л.: ВАС, 1978. С. 239–250.

8. Чернов Ю.А. Распространение радиоволн и прикладные вопросы. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 688 с.

9. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985.

10. Козьмин В.А., Муратов А.В., Сладких В.А. Оценка зоны электромагнитной доступности телекоммуникационных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 27–31.

References

1. Fok V.A. *Problems of Diffraction and Propagation of Electromagnetic Waves*. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1970. 518 p. (in Russ.)

2. Gavelya N.P., Istrashkin A.D., Muraviev Yu.K., Serkov V.P. *Antennas. Part 1*. Leningrad: Military Academy of Telecommunications Publ.; 1963. 633 p. (in Russ.)

3. Serkov V.P. *Radio Wave Propagation and Antenna Devices*. Leningrad: Military Academy of Telecommunications Publ.; 1981. (in Russ.)

4. Rec. ITU-R P.372-16 (08/2022) Radio noise.

5. Kalinin A.I., Cherenkova E.L. *Propagation of Radio Waves and the Operation of Radio Links*. Moscow: Sviaz Publ.; 1971. (in Russ.)

6. Popov O.V., Tumashov A.V., Borisov G.N. Method for Calculating the Loss Asymmetric Vibrators with a Remote Power Point. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics.* 2021;75(4):71–79. DOI:10.18127/j20700784-202104-10

7. Muravyov Yu.K. *Handbook for the Calculation of Wire Antennas*. Leningrad: Military Academy of Telecommunications Publ.; 1978. p.239–250. (in Russ.)

8. Chernov Yu.A. Propagation of Radio Waves and Applied Issues. Moscow: TEKHNOSFERA Publ.; 2017. 688 p. (in Russ.)

9. Aizenberg G.Z. *Shortwave Antennas*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1985. (in Russ.)

10. Kozmin V.A., Muratov A.V., Sladkih V.A. Estimation of Electromagnetic Availability Zone for Telecommunication Systems. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012;2:27–31. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 16.08.2022; одобрена после рецензирования 22.08.2022; принята к публикации 26.08.2022.

The article was submitted 16.08.2022; approved after reviewing 22.08.2022; accepted for publication 26.08.2022.

Информация об авторах:

ПОПОВ Олег Вениаминович	кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ООО «специ- альный технологический центр» log https://orcid.org/0000-0002-5315-2679
ТУМАШОВ Андрей Витальевич	аспирант кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского гос- ударственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича © https://orcid.org/0000-0003-2656-0463
БОРИСОВ Георгий Николаевич	инженер ООО «Специальный технологический центр» log https://orcid.org/0000-0002-3275-251X
КОРОВИН Константин Олегович	кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоси- стем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича в https://orcid.org/0000-0001-7979-3725

000 0