

Научная статья

УДК 621.371.334

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66



Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона

Алексей Алексеевич Типикин✉, alextip@mail.ru

Денис Сергеевич Потапов, denpotapow@yandex.ru

Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова,
Санкт-Петербург, 198514, Российская Федерация

Аннотация: Подстилающая поверхность Земли оказывает существенное влияние на характеристики антенны и энергетические параметры радиотрассы. Несмотря на то, что теоретические аспекты влияния конечной проводимости подстилающей поверхности на антенны достаточно исследованы, требуется разработка частной методики, позволяющей автоматизировать расчеты энергетических параметров радиотрасс скачковым методом. В статье представлена методика учета электрических характеристик подстилающей поверхности, отличающаяся возможностью использования цифровых карт и автоматизации вычислений, представлены отдельные результаты расчетов поправочных антенных коэффициентов, подтверждающие теоретические выкладки. Разработанная методика может применяться при расчетах энергетических параметров радиотрасс скачковыми методами.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, очень низкие частоты, прогнозирование энергетических параметров, антенны, корректирующие коэффициенты

Ссылка для цитирования: Типикин А.А., Потапов Д.С. Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 60–66. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66

Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on VLF Antennas Characteristics

Aleksey Tipikin✉, alextip@mail.ru

Denis Potapov, denpotapow@yandex.ru

Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov,
St. Petersburg, 198514, Russian Federation

Abstract: The Earth's underlying surface has a significant impact on the characteristics of antennas and the energy parameters of the radio path. Although the theoretical aspects of the influence of the finite conductivity of the underlying surface on antennas have been sufficiently studied, there is a need for the development of a specific methodology that would allow to automatize energy parameters calculations of radio paths using the wavehop method. This article presents a methodology for accounting for the electrical characteristics of the subsoil surface,

which differs in its ability to use digital maps and automate calculations. It also includes separate calculation results for correcting antenna coefficients that confirm the theoretical calculations. The developed methodology can be used for calculations of energy parameters of radio paths using the wavehop method.

Keywords: underlying surface, very low frequency, predicting of energy parameters, antennas, correction coefficients

For citation: Tipikin A., Potapov D. Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on VLF Antennas Characteristics. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3): 60–66. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66

Введение

Прогнозирование энергетических параметров радиотрасс является актуальной задачей, возникающей в процессе планирования радиосетей различных частотных диапазонов, в том числе и диапазона очень низких частот (ОНЧ) [1, 2]. С этой целью используются как волновые методики, дающие строгое решение распространения радиоволн в волноводе, образованном сферическими поверхностями Земли и ионосферы [3], так и скачковые методики, представляющие напряженность поля в точке приема в виде суммы нескольких лучей (мод) с разным количеством скачков и земной волны [4]. Если для учета характеристик ионосферы и подстилающей поверхности волновые методики обычно пользуются значительными приближениями реальных характеристик, что связано с особенностями решения волновых уравнений, то скачковые методики обладают более простыми алгоритмами учета указанных параметров. Это дает возможность в полной мере использовать стандартную модель ионосферы [5–7] и цифровые карты подстилающей поверхности Земли [8, 9].

Стандартная модель ионосферы (IRI, аббр. от англ. International Reference of Ionosphere) – это международный проект, спонсируемый Комитетом по космическим исследованиям (COSPAR) и Международным союзом радиовещания (URSI). Указанные организации создали рабочую группу, в которую вошли представители различных стран, в том числе и из России. В конце 60-х годов была создана эмпирическая стандартная модель ионосферы на основе всех доступных источников данных. Выпущено несколько вариантов модели. Для данного местоположения, времени и даты IRI предоставляет среднемесячные значения электронной плотности, электронной температуры, температуры ионов и состава ионов в диапазоне ионосферных высот, критические частоты и другие данные.

Цифровые карты электрических характеристик подстилающей поверхности земли в ОНЧ-диапазоне представляют собой набор числовых массивов с геопривязкой. Общая методика формирования цифровых карт изложена в статье [9].

В скачковых методиках характеристики ионосферы и подстилающей поверхности Земли учи-

тываются с помощью соответствующих коэффициентов отражения [10]. Коэффициенты отражения от ионосферы получаются на основе эмпирических данных, аппроксимированных функциями, зависящими от индекса солнечной активности F10.7, косинуса зенитного угла Солнца в точке отражения $\cos \chi$ и произведения частоты электромагнитной волны на косинус угла падения на ионосферу $f \cos i$.

Кроме коэффициентов отражения от поверхности Земли, характеристики подстилающей поверхности влияют также на диаграмму направленности передающей и приемной антенн, что учитывается с помощью поправочного коэффициента антенны. Рекомендованный способ расчета, приведенный в [10], дает только модуль коэффициента, в то время как другие способы [11, 12] представлены либо табличными, либо графическими результатами, что не позволяет использовать их в автоматизированных методиках. Указанные недостатки определяют цель статьи, которая заключается в разработке автоматизированной методики учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн на радиотрассе диапазона ОНЧ, позволяющей рассчитывать модуль и аргумент поправочного антенного коэффициента.

Методика

В соответствии с [11, 13] поправочный коэффициент антенны, расположенной на сферической поверхности с конечной проводимостью, рассчитывается через параметр потерь:

$$A = \delta(ka)^{1/3}, \quad (1)$$

где $\delta = \sqrt{2\pi\epsilon_0 f / 2\sigma}$; ϵ_0 – электрическая постоянная (Ф/м); f – частота (Гц); σ – проводимость (См/м); $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны в вакууме (м); $a = 1,25$; $R_z = 8495000$ – эффективный радиус Земли при нормальной рефракции (м); диэлектрический параметр определяется по выражению:

$$\alpha = \frac{\epsilon}{(60\pi\sigma a)^{2/5}}, \quad (2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Графики параметров A и α показаны на рисунке 1.

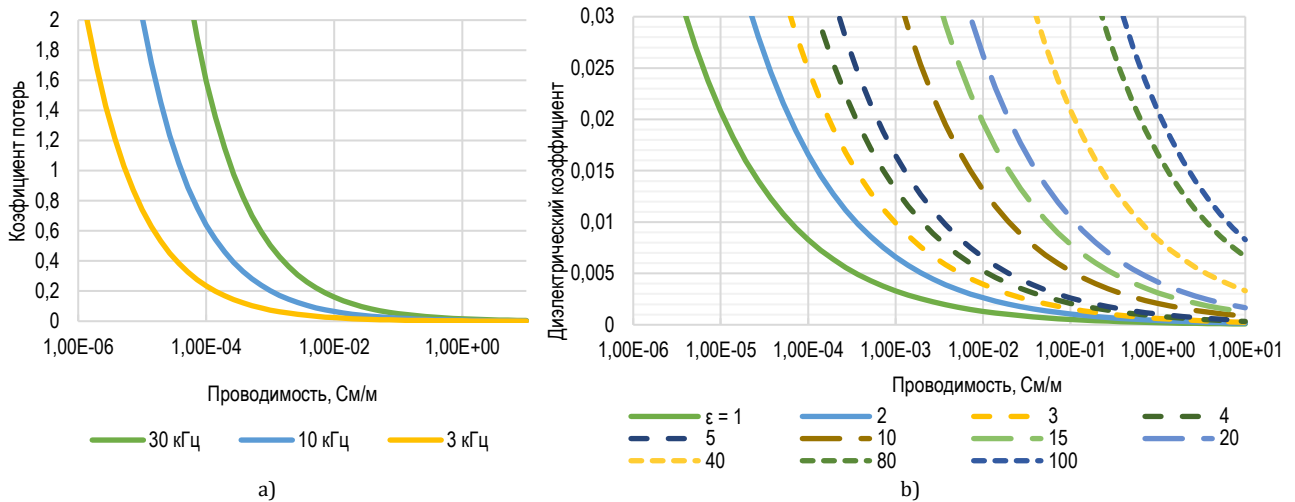


Рис. 1. Коэффициент потерь (а) и диэлектрический коэффициент (б)

Fig. 1. Loss Factor (a) and Dielectric Factor (b)

Для расчета величин ϵ и σ на основе цифровых карт [9] требуется не только определение координат точки расположения передатчика или приемника, но и определенной области земной поверхности, окружающей эту точку и участвующей в формировании электромагнитной волны. Если угол места θ , т. е. угол между направлением на точку отражения от ионосферы и касательной к поверхности земли, является неотрицательным, то с указанной целью выделяется область пространства, участвующая в передаче электромагнитной волны, которая в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля представляет собой эллипсоид. В фокусах эллипсоида находятся точки передачи и приема [14–16]. Область, влияющая на распространение электромагнитной волны, является сечением эллипсоида земной поверхностью. Пренебрегая кривизной земли, можно считать эту область эллипсом. Большая полуось, малая полуось эллипса и смещение точки пересечения оси эллипса с Земной поверхностью определяются из выражений (3–5).

$$2a = R \frac{\sqrt{\lambda R(\lambda R + 12h_1h_2)}}{\lambda R + 3(h_1 + h_2)^2}; \quad (3)$$

$$2b = R \frac{\sqrt{\lambda R(\lambda R + 12h_1h_2)}}{3[\lambda R + 3(h_1 + h_2)^2]}; \quad (4)$$

$$c = R \frac{h_2 - h_1}{2(h_1 + h_2) \left[1 + \frac{3(h_1 + h_2)^2}{\lambda R} \right]}; \quad (5)$$

где R – расстояние между точками отражения (км); λ – длина волны на заданной частоте (км); h_1, h_2 – высоты точек отражения (км); $h_1 = 0$ – для передающей антенны; $h_2 = 0$ – для приемной антенны.

Если угол места θ отрицательный, то при распространении радиоволны наблюдается механизм так называемого «проскальзывания» [17], т. е. часть пути луч преодолевает вдоль земли дифракционной волной и часть пути – по прямолинейной тра-

ектории ионосферной волной. В этом случае большая ось эллипса принимается равной дифракционному сегменту траектории, а малая полуось – рассчитывается по формуле (4) при $h_1 = h_2 = 0$.

После того, как получены электрические характеристики подстилающей поверхности и вычислены параметры A и α , рассчитывается поправочный антенный коэффициент, который для расстояния, не превышающего границу оптического горизонта, определяется по формуле:

$$F = \frac{e^{-ika\theta}}{\sqrt{\pi}} \int_{\Gamma} \frac{e^{-iXt}}{W_1'(t) - qW_1(t)} dt, \quad (6)$$

где $X = \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$; $q = -i \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{\eta_0}{Z}$; $W_L(t)$ – интеграл Эйри; Z/η_0 – комплексный параметр, определяемый через поверхностный импеданс Z , приблизительно равный волновому сопротивлению среды, и $\eta_0 = 120\pi$. Контур интегрирования Γ проходит из бесконечности вдоль кривой $e^{-i2\pi/3}$ до нуля и уходит вдоль действительной оси в бесконечность [11].

Интегралы Эйри могут быть вычислены по формулам:

$$W_1(t) = -ie^{-\frac{i2\pi}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{3}} t H_{\frac{1}{3}}^{(2)} \left[\frac{2}{3} e^{-i\frac{3\pi}{2}} t^{\frac{3}{2}} \right], \quad (7)$$

$$W_1'(t) = -ie^{-\frac{i4\pi}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{3}} t H_{\frac{2}{3}}^{(2)} \left[\frac{2}{3} e^{-i\frac{3\pi}{2}} t^{\frac{3}{2}} \right], \quad (8)$$

где $H_{\frac{1}{3}}^{(2)}[z]$ и $H_{\frac{2}{3}}^{(2)}[z]$ – функции Ханкеля второго рода порядка $1/3$ и $2/3$, соответственно.

За пределами области геометрической оптики антенный коэффициент сводится к бесконечному ряду вида:

$$F' = -2i\sqrt{\pi} e^{-ika\theta} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{e^{-i(ka)^{\frac{1}{3}}\theta\tau_s}}{\left(2^{\frac{1}{3}}\tau_s - q^2\right) W_1\left(2^{\frac{1}{3}}\tau_s\right)}, \quad (9)$$

где τ_s – корни специального уравнения Риккати:

$$\frac{dv}{d\tau} + 2v^2\tau + 1 = 0. \quad (10)$$

Методика реализована в виде скрипта Matlab и показана в качестве блок-схемы на рисунке 2. После запуска скрипта загружаются структуры *PtsStruct* и *DiffErr* с исходными данными, которые формируются в соответствии с частными методиками [16, 18]. Далее последовательно открываются циклы по максимальному учитываемому количеству скачков (мод), количеству рассчитываемых частот и числу скачков в моде. В блоке 5 проверяется условие наличия дифракционного пути, в зависимости от чего выбирается способ расчета области, существенно влияющей на характеристики антенны при распространении ЭМВ заданной частоты при заданном угле места – блоки 6 и 7.

В блоке 8 полученные параметры эллипса преобразуются в объекты геопривязки *geoshape*. После чего по картам электрических параметров подстилающей поверхности вычисляются эффективные значения ϵ и σ [9]. Для этого найденные эллиптические области преобразуются в растровые маски посредством функции *vec2mtx* (блок 9). С помощью масок на растровых картах электрических характеристик подстилающей поверхности выделяются массивы величин ϵ и σ . В качестве эффективных значений используются медианные значения проводимости и диэлектрической проницаемости, на их основе с помощью функции *FresZonesCalc* рассчитываются поправочные антенные коэффициенты (блок 10). После завершения расчетов все данные записываются в структуру *FresZones*.

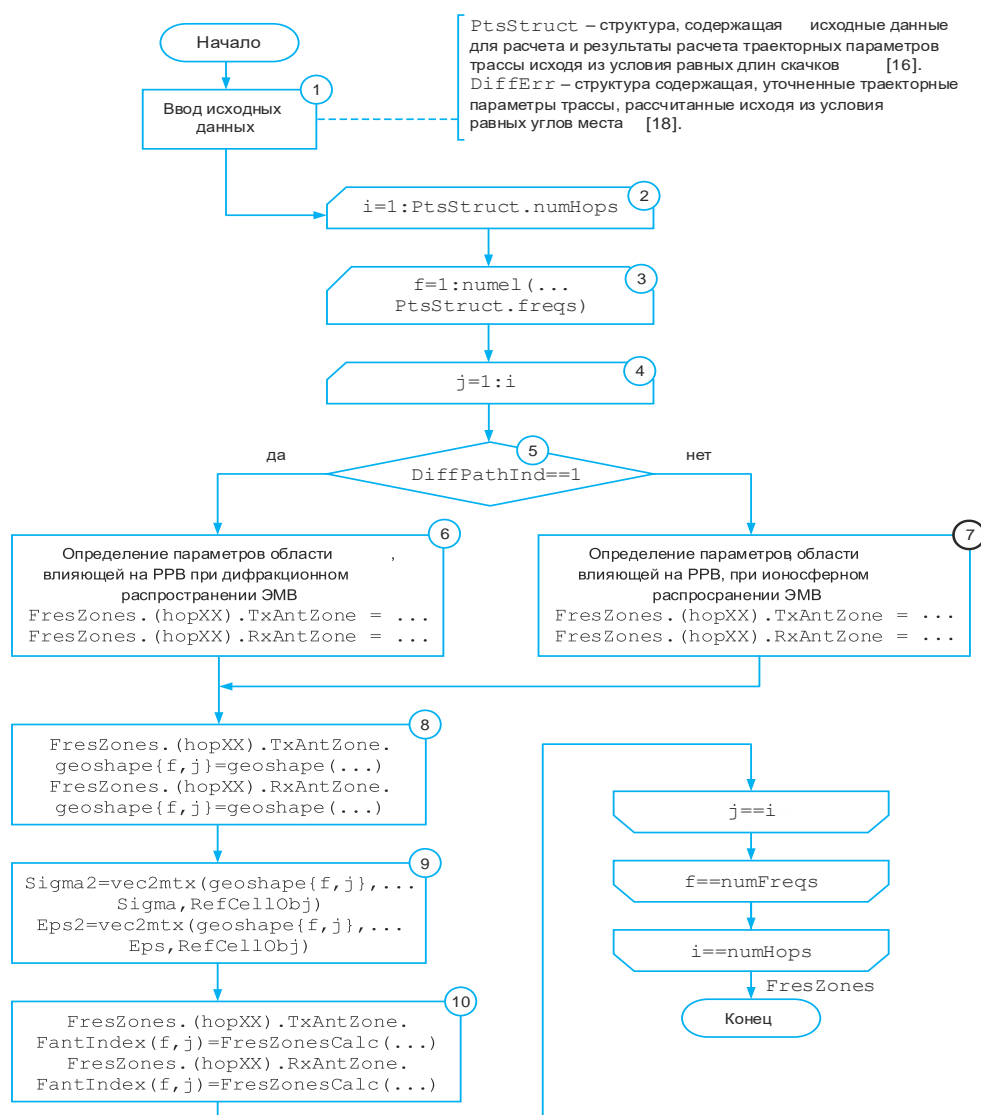


Рис. 2. Блок-схема методики учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн

Fig. 2. Flowchart of the Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on Antennas Characteristics

Результаты и выводы

Примеры расчета модуля и аргумента поправочного антенного коэффициента для условий $\sigma = 5 \text{ См/м}$, $\epsilon = 80 \text{ 1/м}$ показаны на рисунке 3.

С помощью разработанной методики проведены расчеты поправочных антенных коэффициентов для радиотрассы с началом в точке $54,4504^\circ \text{ с.ш.}$, $26,7811^\circ \text{ в.д.}$ и концом в точке $23,3869^\circ \text{ с.ш.}$, $63,5690^\circ \text{ з.д.}$ На рисунке 4 показаны области подстилающей поверхности, влияющие на характеристики передающей и приемной антенн соответственно для 5 скачкового луча и рабочей частоты 3 кГц. Цветовым градиентом на рисунках обозначена проводимость.

В таблицах 1 и 2 представлены расчеты поправочных антенных коэффициентов F_t и F_r для 5, 10 и 15-скачковых лучей на заданной радиотрассе. Как видно из таблиц, при более пологих траекториях, т. е. при меньшем количестве скачков, влияние подстилающей поверхности с конечной проводимостью, приводит к большему затуханию электромагнитной волны. Существенное, но меньшее влияние, оказывает диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности. Для передающей антенны, расположенной на суше, модуль поправочного коэффициента на 3–9 % ниже, чем для приемной антенны, расположенной на поверхности морской воды.

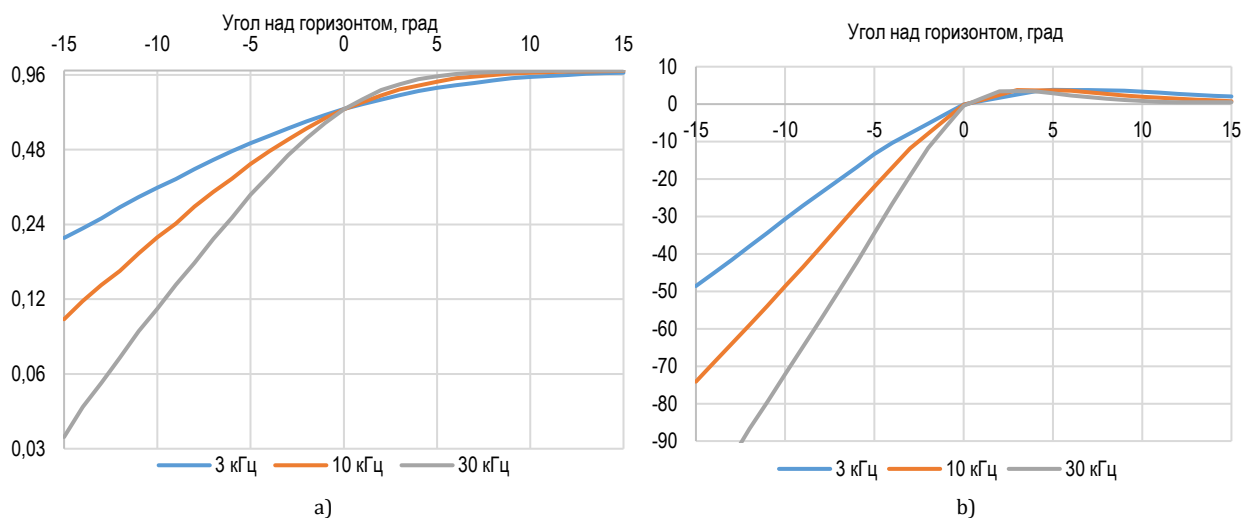


Рис. 3. Модуль (а) и аргумент (б) поправочного антенного коэффициента

Fig. 3. Magnitude (a) and Argument (b) of the Correction Antenna Coefficient

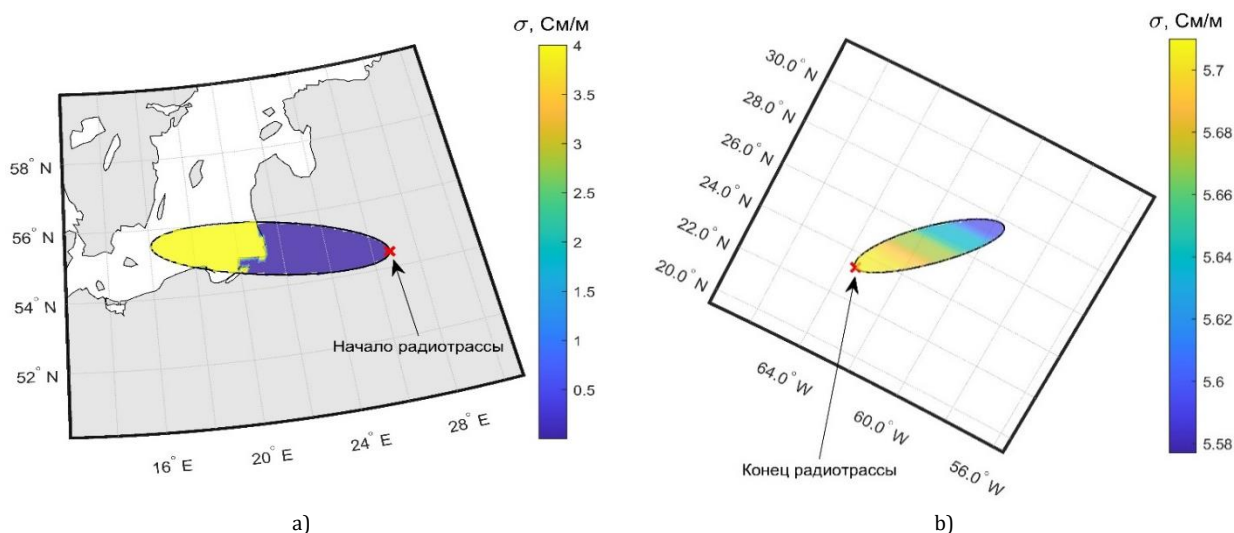


Рис. 4. Область подстилающей поверхности, влияющая на характеристики передающей (а) и приемной (б) антенн при 5-скачковом распространении ЭМВ частотой 3 кГц

Fig. 4. The Area of the Underlying Surface That Affects the Characteristics of the Transmitting (a) and Receiving (b) Antennas at the 5-Hop Electromagnetic Wave Propagation with the Frequency of 3 kHz

ТАБЛИЦА 1. Поправочные антенные коэффициенты для передающей антенны

TABLE 1. Correction Antenna Coefficients for the Transmitting Antenna

Параметр	Частота, кГц	Количество скачков луча		
		5	10	15
σ , См/м	3–30	0,01	0,01–0,003	0,003
ε , 1/м	3–30	8,3	8,3–5,4	5,4
$ F_t $	3	0,74	0,91	0,95
	10	0,75	0,92	0,96
	30	0,75	0,90	0,93
$\arg(F_t)$, град	3	–0,06	2,69	1,0
	10	–1,50	–1,13	–1,16
	30	–5,54	–4,17	–3,6

Разработанная методика может быть использована для расчета поправочных антенных коэффициентов при расчете энергетических параметров радиотрасс скачковыми методами.

Кроме того, с помощью поправочного антенного коэффициента решается ряд частных задач, таких как определение уровня напряженности электромагнитного поля у нижнего края ионосферы при известных характеристиках излучателя, уровень поля, измеренный приемной антенной, падающей волны, а также диаграмма направленности антенны с учетом конечной проводимости сферической подстилающей поверхности.

ТАБЛИЦА 2. Поправочные антенные коэффициенты для приемной антенны

TABLE 1. Correction Antenna Coefficients for the Receiving Antenna

Параметр	Частота, кГц	Количество скачков луча		
		5	10	15
σ , См/м	3–30	5,67–5,70	5,70–5,71	5,7
ε , 1/м	3–30	69,35–69,23	69,22–69,20	69,21–69,19
$ F_r $	3	0,76	0,91	0,98
	10	0,77	0,97	0,99
	30	0,81	0,99	0,99
$\arg(F_r)$, град	3	1,22	3,68	2,28
	10	1,89	2,53	0,97
	30	2,74	1,23	0,52

Перспективным направлением для продолжения исследования с точки зрения реализации машинных алгоритмов является способ определения области, участвующей в формировании диаграммы направленности антенны. Хранение полной цифровой карты подстилающей поверхности в зависимости от ее разрешения может занимать до нескольких гигабайт в оперативной памяти, поэтому ее обработка занимает длительное время (при проведении серии расчетов – до нескольких часов). Целесообразно проработать вопрос предварительного выделения участка карты, подлежащего обработке (тайла), который будет загружаться и обрабатываться отдельно от общей карты.

Список источников

1. Bradley P.A. IRI and VLF/LF radio service planning // Advances in Space Research. 2001. Vol. 27. Iss. 1. PP. 145–152. DOI:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
2. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with AWESOME instrument // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. Iss. 1. PP. 3–17. DOI:10.1109/TGRS.2009.2028334
3. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics // Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations. 2010. Vol. 1286. Iss. 1. PP. 3–41. DOI:10.1063/1.3512893
4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S.K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory // Advances in Geosciences. 2011. Vol. 27. PP. 1–11. DOI:10.1142/9789814355414_0001
5. Bilitza D. IRI the international Standard for the ionosphere // Advances in Radio Science. 2018. Vol. 16. PP. 1–11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018
6. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernández-Pajares M., Reinisch B., et al. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps // Remote Sens. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 3531. DOI:10.3390/rs12213531
7. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Nava B., et al. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion // Atmosphere. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 371. DOI:10.3390/atmos13030371
8. Типикин А.А., Потапов Д.С. Методика оценки электрических характеристик почвы на трассе распространения земных радиоволн // Техника радиосвязи. 2022. № 1(52). С. 19–29. DOI:10.33286/2075-8693-2022-52-19-29
9. Типикин А.А. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне очень низких частот // Информатика, телекоммуникации и управление. 2022. Т. 15. № 1. С. 7–18. DOI:10.18721/JCSTCS.15101
10. Рекомендация МСЭ R P.684-7 (9/2016). Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц.
11. Wait J., Conda A. Pattern of an antenna on a curved lossy surface // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1958. Vol. 6. Iss. 4. PP. 348–359. DOI:10.1109/TAP.1958.1144610
12. Hyoalti D.C. Computations of the antenna cut-back factor for LF radio waves. Technical note №330. Boulder Laboratories, 1965.
13. Knight P. MF propagation: a wavehop method for ionospheric field strength prediction // BBC eng. 1973. Vol. 100. P. 22–34.
14. Coleman C.J. Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 296 p.

15. Gonzalez G. Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods. Boca Raton: CRC Press, 2022. 708 p.
16. Типикин А.А., Пыков Е.В. Уточненная модель высоты точки отражения для методики прогнозирования энергетических параметров радиотрасс в диапазоне очень низких частот // Труды всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в вооруженных силах Российской Федерации». СПб.: ВАС, 2022.
17. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 152 с.
18. Типикин А.А., Пыков Е.В., Розанов А.А. Модифицированная методика расчета дифференциальных временных задержек лучей в лучевой модели распространения радиоволн ОНЧ диапазона // Сборник трудов научно-технической конференции «Интеллектуальные разработки в интересах строительства и развития Военно-морского флота». 2022. С. 47–56.

References


1. Bradley P.A. IRI and VLF/LF radio service planning. *Advances in Space Research*. 2001;27(1):145–152. DOI:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
2. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with AWESOME instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010;48(1):3–17. DOI:10.1109/TGRS.2009.2028334
3. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics. *Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations, 13–18 March 2010, Kolkata, India*. 2010. vol.126(1). p.3–41. DOI:10.1063/1.3512893
4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S.K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory. *Advances in Geosciences*. 2011;27:1–11. DOI:10.1142/9789814355414_0001
5. Bilitza D. IRI the international Standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*. 2018;16:1–11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018
6. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., H.-P. Manuel, Reinisch B., et al. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps. *Remote Sens*. 2020;12(21):3531. DOI:10.3390/rs12213531
7. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Nava B., et al. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion. *Atmosphere*. 2022;13(3):371. DOI:10.3390/atmos13030371
8. Tipikin A.A., Potapov D.S. Evaluation of the electrical characteristics of the soil on the path of propagation of surface radio waves. *Tekhnika radiosvyazi*. 2022;1(52):19–29. (in Russ.) DOI:10.33286/2075-8693-2022-52-19-29
9. Tipikin A.A. Method of obtaining global digital maps of underlying surface electric characteristics in the very low frequency band. *Computing, Telecommunication and Control*. 2022;15(1):7–18. (in Russ.) DOI:10.18721/JCSTCS.15101
10. Rec. ITU-R P.684-7. *Prediction of field strength at frequencies below about 150 kHz*. September 2016.
11. Wait J., Conda A. Pattern of an antenna on a curved lossy surface. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. 1958;6(4):348–359. DOI:10.1109/TAP.1958.1144610
12. Hyovalti D.C. *Computations of the antenna cut-back factor for LF radio waves. Technical note №330*. Boulder Laboratories; 1965.
13. Knight P. MF propagation: a wavehop method for ionospheric field strength prediction. *BBC eng*. 1973;100:22–34.
14. Coleman C.J. *Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 296 p.
15. Gonzalez G. *Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods*. Boca Raton: CRC Press; 2022. 708 p.
16. Tipikin A.A., Pykov E.V. A refined model of the height of the reflection point for the prediction method of radio tracks energy parameters in the very low frequency band. *Proceedings of the All-Army Scientific and Practical Conference «Innovations in Armed Forces of the Russian Federation»*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2022. (in Russ.)
17. Makarov G.I., Novikov V.V., Rybachek S.T. *Propagation of radio waves in the Earth-ionosphere waveguide channel and in the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ.; 1994. 152 p. (in Russ.)
18. Tipikin A.A., Pykov E.V., Rozanov A.A. A modified method for calculating the differential time delays of rays in the wavehop model of radio waves propagation in the VLF band. *Proceedings of the Scientific and Technical conference on Intellectual investigations in the interests of the development and improvement of the Navy*. 2022. p.47–56. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.


The article was submitted 30.04.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 06.06.2023.

Информация об авторах:

ТИПИКИН
Алексей Алексеевич

кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий и разведки Военно-морской академии им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова
 <https://orcid.org/0000-0002-0940-4285>

ПОТАПОВ
Денис Сергеевич

младший научный сотрудник отдела научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий и разведки Военно-морской академии им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова
 <https://orcid.org/0009-0008-2289-1576>