

Научная статья

УДК 621.371.334

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73>

Методика автоматического профилирования электрических характеристик подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн ОНЧ-диапазона

- Алексей Алексеевич Типикин ✉, alextip@mail.ru
- Владимир Александрович Пахотин, v.pakhotin@mail.ioffe.ru
- Денис Сергеевич Потапов, denpotapow@yandex.ru

Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, 198514, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Сведения об электрических характеристиках подстилающей поверхности оказывают существенное влияние на результаты расчетов энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот. В настоящее время разработаны различные варианты цифровых карт, которые потенциально способны повысить точность расчетов и упростить действия оператора по вводу исходных данных, однако возможности цифровой картографии не внедрены в существующие методики прогнозирования. **Целью исследования** является снижение количества ручных операций в ходе прогнозирования энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот путем разработки методики, позволяющей автоматизировать ввод электрических характеристик подстилающей поверхности. **Методы.** Для рационального обоснования выбора уровней квантования электрических параметров радиотрасс в работе использованы методы математической статистики. Для получения профиля электрических характеристик, отвечающего требованиям методики прогнозирования, использован метод интерполяции с заданным коэффициентом децимации. **Результаты.** С помощью статистических оценок выбраны уровни и интервалы квантования электрических характеристик подстилающей поверхности, которые используются при формировании горизонтальных профилей. Далее для исключения участков с частым изменением значений характеристик выполняется интерполяция методом «ближайшего соседа» с заданным коэффициентом децимации, который выбирается исходя из того, что наименьшая длина однородного участка не должна быть меньше длины волны. Разработанная методика реализована в среде моделирования Matlab и представляет собой совокупность скриптов и вспомогательных функций. Приведен пример использования методики в рамках прогнозирования напряженности поля земной волны на разнородной трассе. **Новизна** заключается в разработке оригинальной методики, обеспечивающей рациональное профилирование электрической проводимости и диэлектрической проницаемости земной поверхности для последующего использования полученных данных в задачах прогнозирования энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот. **Практическая значимость.** Разработанная методика позволяет снизить нагрузку на оператора при вводе исходных данных и повысить точность представления этих данных. Методика может быть использована в скачковом методе прогнозирования энергетических параметров радиотрасс для определения векторной суммы пространственной и земной волн в точке приема.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, электрические характеристики, очень низкие частоты, радиотрасса, горизонтальный профиль, прогнозирование энергетических параметров

Ссылка для цитирования: Типикин А.А., Пахотин В.А., Потапов Д.С. Методика автоматического профилирования электрических характеристик подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн диапазона очень низких частот // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 66–73. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73. EDN:MHACGD

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73>

Technique for Automatic Profiling of Underlying Surface Electric Parameters on the Very Low Frequencies Radio Path

✉ **Aleksey A. Tipikin**, alextip@mail.ru
✉ **Vladimir A. Pakhotin**, v.pakhotin@mail.ioffe.ru
✉ **Denis S. Potapov**, denpotapow@yandex.ru

Navy Development of the Military Research and Educational Center of the Navy “Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov”
St. Petersburg, 198514, Russian Federation

Annotation

Relevance. Information about the electrical characteristics of the underlying surface has a significant impact on the calculations results of the radio tracks energy parameters in the very low frequency band. Currently, various versions of developed digital maps can potentially improve the accuracy of calculations and simplify the operator's activities in the initial data input. However, the capabilities of digital cartography are not integrated into existing forecasting techniques. The **purpose of the study** is to reduce the number of manual operations during the forecasting of the radio tracks energy parameters in the very low frequency band by developing a technique that allows to automate the input of the underlying surface electrical parameters. **Methods.** In this study we used methods of mathematical statistics to choose the quantization levels of radio tracks electrical parameters rationally. We used an interpolation method with a given decimation coefficient to obtain an electrical characteristics profile that meets the requirements of the forecasting methodology. **Result.** We selected the levels and quantization intervals of the underlying surface electrical characteristics which are needed to obtain the horizontal profiles, using statistical estimates. Further, we performed interpolation with the «nearest neighbor» method with a given decimation coefficient to exclude areas with frequent changes in the profiling parameters values. The decimation coefficient relies on the condition that the smallest length of a homogeneous section should not be less than the wavelength. The developed technique is implemented in the Matlab modeling environment as a combination of scripts and auxiliary functions. We provided an example of the technique application as the forecasting the ground wave field strength on a heterogeneous track. The **novelty** lies in the development of an original technique that provides rational profiling of the underlying surface electrical conductivity and dielectric permittivity for the subsequent usage of the obtained data in the forecasting the radio tracks energy parameters in the very low frequency band. **Practical significance.** The developed technique makes it possible to reduce the operator load during the initial data input and increases the accuracy of presenting this data. The technique can be used in a wavehop method for the predicting the radio tracks energy parameters to determine the vector sum of spatial and ground waves at the receiver.

Keywords: *underlying surface, electrical characteristics, very low frequencies, radio path, horizontal profile, energy parameters prediction*

For citation: Tipikin A.A., Pakhotin V.A., Potapov D.S. Technique for Automatic Profiling of Underlying Surface Electric Parameters on the Very Low Frequencies Radio Path. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(3): 66–73. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73. EDN:MHACGD

Введение

Определение характеристик подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн – одна из важнейших проблем прогнозирования энергетических параметров радиотрасс. От проводимости и диэлектрической проницаемости под-

стилающей поверхности напрямую зависит дальность распространения радиоволн [1, 2], в том числе волн диапазона очень низких частот (ОНЧ), занимающего промежуток частот от 3 до 30 кГц. В модели распространения радиоволн ОНЧ-диапазона поверхность Земли и ионосфера образуют сферический волновод, поэтому для наиболее

адекватного прогнозирования энергетических параметров радиотрасс необходимо как можно точнее знать характеристики стенок этого волновода. Для ионосферы получена и периодически уточняется международная эталонная модель ионосферы, находящаяся в свободном доступе [3–5]; для земной поверхности разработаны карты электрических характеристик в ОНЧ-диапазоне [6–8], отличающиеся от известных карт [9, 10] более высокой детализацией, глобальным охватом и наличием сведений о диэлектрической проницаемости. Основой для картирования электрических характеристик земной поверхности могут также служить карты геоэлектрических разрезов [11].

Общим недостатком всех существующих карт является невозможность их непосредственного использования при прогнозировании распространения радиоволн. Это связано с тем, что карты, представленные на бумажных носителях, требуют оцифровки. Если карта уже оцифрована, то необходимо составить горизонтальный профиль электрических характеристик земной поверхности. Указанная задача не является тривиальной по следующим причинам: во-первых, электрические характеристики земной поверхности вдоль радиотрассы могут меняться либо непрерывно, либо весьма часто, поэтому необходим обоснованный выбор количества участков профиля, с одной стороны, не слишком большого, чтобы не перегружать вычисления, а с другой стороны не слишком малого, чтобы чрезмерно не загроублять их; во-вторых, операция профилирования должна быть автоматической и обходиться без участия оператора по вводу дополнительных данных.

Таким образом, указанные недостатки определяют цель исследования, которая заключается в разработке методики автоматического профилирования электрических характеристик земной поверхности с использованием глобальных цифровых карт [7, 8] и входных данных на основе задачи расчета напряженности поля пространственной волны, описанной в [12].

Методика

Первым этапом методики является квантование картографических данных. Процесс квантования представляет собой отображение переменной x , зафиксированной на карте и определенной на множестве N непрерывных непересекающихся интервалов \mathcal{R}_i , $i = 1, 2, \dots, N$, называемых интервалами квантования, во множество дискретных значений \hat{x}_i , $i = 1, 2, \dots, N$, называемых уровнями квантования, причем \hat{x}_i находится в пределах интервала \mathcal{R}_i [13]. Для выполнения процедуры квантования необходимо разбить непрерывное множество \mathcal{R} на интервалы квантования \mathcal{R}_i и назначить уровни квантования \hat{x}_i .

Формально процедуру квантования можно записать в виде выражения:

$$Q(x|x \in \mathcal{R}) \Rightarrow \hat{x}|\hat{x}_i \in \mathcal{R}_i; \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Для электрической проводимости в диапазоне от 10^{-6} до $1,7$ См/м квантование осуществляется в соответствии с таблицей 1 рекомендации [10]. В области $\sigma > 1,7$ См/м границы интервалов квантования выбираются, исходя из статистических характеристик данных таким образом, чтобы в полученные интервалы попадали пики гистограммы. Часть гистограммы в диапазоне от $1,5$ до 6 См/м показана на рисунке 1, где штриховыми линиями обозначены границы интервалов квантования. В качестве уровней квантования выбираются медианы соответствующих интервалов.

ТАБЛИЦА 1. Интервалы и уровни квантования проводимости подстилающей поверхности

TABLE 1. Intervals and Levels of Quantization of the Underlying Surface Conductivity

Проводимость, См/м	
Интервал квантования	Уровень квантования
$\sigma < 1,7 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
$1,7 \cdot 10^{-5} \leq \sigma < 5,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
$5,5 \cdot 10^{-5} \leq \sigma < 1,7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
$1,7 \cdot 10^{-4} \leq \sigma < 5,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$5,5 \cdot 10^{-4} \leq \sigma < 1,7 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
$1,7 \cdot 10^{-3} \leq \sigma < 5,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$5,5 \cdot 10^{-3} \leq \sigma < 1,7 \cdot 10^{-2}$	0,01
$0,017 \leq \sigma < 0,055$	0,03
$0,055 \leq \sigma < 0,17$	0,11
$0,17 \leq \sigma < 0,55$	0,36
$0,55 \leq \sigma < 1,7$	1,13
$1,7 \leq \sigma < 3,3$	2,69
$3,3 \leq \sigma < 4,7$	3,94
$\sigma \geq 4,7$	5,49

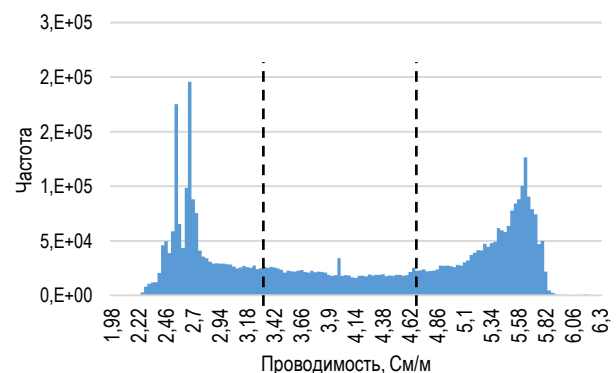


Рис. 1. Гистограмма значений проводимости подстилающей поверхности

Fig. 1. Histogram of Underlying Surface Conductivity Values

Аналогичные подходы применены для квантования диэлектрической проницаемости, с той разницей, что интервалы квантования выбирались исходя из частот значений проницаемости во всем возможном диапазоне (в данном случае под частотой понимается термин математической статистики – частота признака). Границы интервалов квантования и уровни квантования представлены в таблице 2.

Вторым этапом после квантования является интерполяция, которая заключается в вычислении неизвестного значения зависимой переменной, внутри некоторого отрезка, по известным значениям этой переменной на концах этого отрезка. Интерполяция выполняется путем поиска функции f , которая принимает известные значения y_i в заданных точках x_i , т. е. выполняется $f(x_i) = y_i$ для всех i . Метод ближайшего соседа заключается в том, что функции на заданном интервале присваивается значение, равное ближайшему известному значению функции [14].

ТАБЛИЦА 2. Интервалы и уровни квантования диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности

TABLE 2. Intervals and Levels of Quantization of the underlying Surface Dielectric Permittivity

Диэлектрическая проницаемость, 1/м	
Интервал квантования	Уровень квантования
$\epsilon < 2,5$	1,9
$2,5 \leq \epsilon < 4,5$	3,9
$4,5 \leq \epsilon < 7$	5,4
$7 \leq \epsilon < 10$	8,3
$10 \leq \epsilon < 15$	12,8
$15 \leq \epsilon < 67$	41
$67 \leq \epsilon < 72$	69,6
$72 \leq \epsilon < 77$	74,6
$\epsilon \geq 77$	79,5

В данном случае интерполяция методом ближайшего соседа используется совместно с децимацией интерполируемых точек в необходимой пропорции, чтобы исключить участки с частым изменением значений электрических характеристик. Для этого задается условие, в соответствии с которым наименьшая длина однородного участка не может быть меньше длины волны.

Реализация методики

Методика реализована в виде скрипта Matlab. Блок-схема методики показана на рисунке 2. После запуска скрипта загружаются исходные данные, включающие интерполяционные объекты с электрическими параметрами подстилающей поверхности, объект геопривязки, расчетные частоты, координаты начала и конца радиотрассы и границы

интервалов квантования проводимости и диэлектрической проницаемости поверхности Земли (блок 1). Все данные, кроме границ интервалов квантования, берутся из решения задачи об определении напряженности поля пространственной волны [12].

Далее открывается цикл для определения квантованных значений проводимости (блоки 2–8), в котором с помощью операторов ветвления (блоки 3 и 5) рассматриваются три различных случая:

$$\sigma < \sigma_1, \sigma \geq \sigma_n,$$

$$\sigma_{i-1} \leq \sigma < \sigma_i, i = 2, 3, \dots, n,$$

где n – количество интервалов квантования.

В блоках 4, 6 и 7 вычисляются медианные значения параметров на интервале. Аналогичные операции выполняются в цикле для определения квантованных значений проницаемости (блоки 9 и 10), квантованные значения параметров записываются в соответствующие переменные (блок 11). Затем открывается цикл по расчетным частотам (блок 12), для каждой из которых составляется горизонтальный профиль подстилающей поверхности с помощью функции mapprofile (блок 13). В блоке 14 выполняется квантование профилей с помощью найденных квантованных значений и заданных интервалов квантования путем вызова функции quantiz. В блоке 15 осуществляется интерполирование квантованного профиля с децимацией интерполируемых точек. Полученные данные записываются в структуру segsData, которая содержит входные данные для расчета напряженности поля земной волны (блок 16). Операции, указанные в блоках 2–12, являются предварительными и непосредственно во время профилирования не выполняются, так как используются уже найденные квантованные значения, загружаемые из сохраненных переменных.

Пример расчета напряженности Земной волны с помощью полученного профиля

В качестве примера на рисунке 3 показана трасса Нижний Новгород (56,25° с. ш., 44,00° в. д.) – Гренландское море (75,00° с. ш., 0,00° в. д.), протяженность трассы составляет 2775,9 км. Около 2/3 трассы составляет континентальный участок, проходящий через северо-западную часть Восточно-Европейской равнины с проводимостью 0,01–0,03 См/м и Скандинавский полуостров с преимущественной горной и каменистой поверхностью, проводимость которой составляет 0,001–0,003 См/м. Оставшаяся часть трассы проходит через Гренландское море с высокой проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Для указанной трассы выполнено горизонтальное профилирование электрических характеристик земной поверхности с последующим квантованием и интерполяцией полученного профиля. Результаты профилирования показаны на рисунке 4.

На основе найденного профиля получена зависимость напряженности поля земной волны от расстояния с помощью методики [15], где для выполнения серии расчетов и построения зависимости напряженности поля земной волны от расстояния на каждом однородном i -м участке трассы ($i \geq 2$) использовано сглаживание экспоненциальной функцией вида $1/\exp[(x - a)/b]$. Коэффициенты a

и b подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие $E(d) = \frac{1}{2} (E_{i-1}(d) + E_i(d))$, где E_i – рассчитывается исходя из однородности оставшегося участка трассы с параметрами σ_i и ϵ_i , E_{i-1} берется с предыдущей итерации цикла и $d = d_{i-1}^2 + 2(d_{i-1}^2 - d_{i-1}^1)$. Здесь верхний индекс 1 обозначает начальную точку соответствующего однородного участка, 2 – конечную.

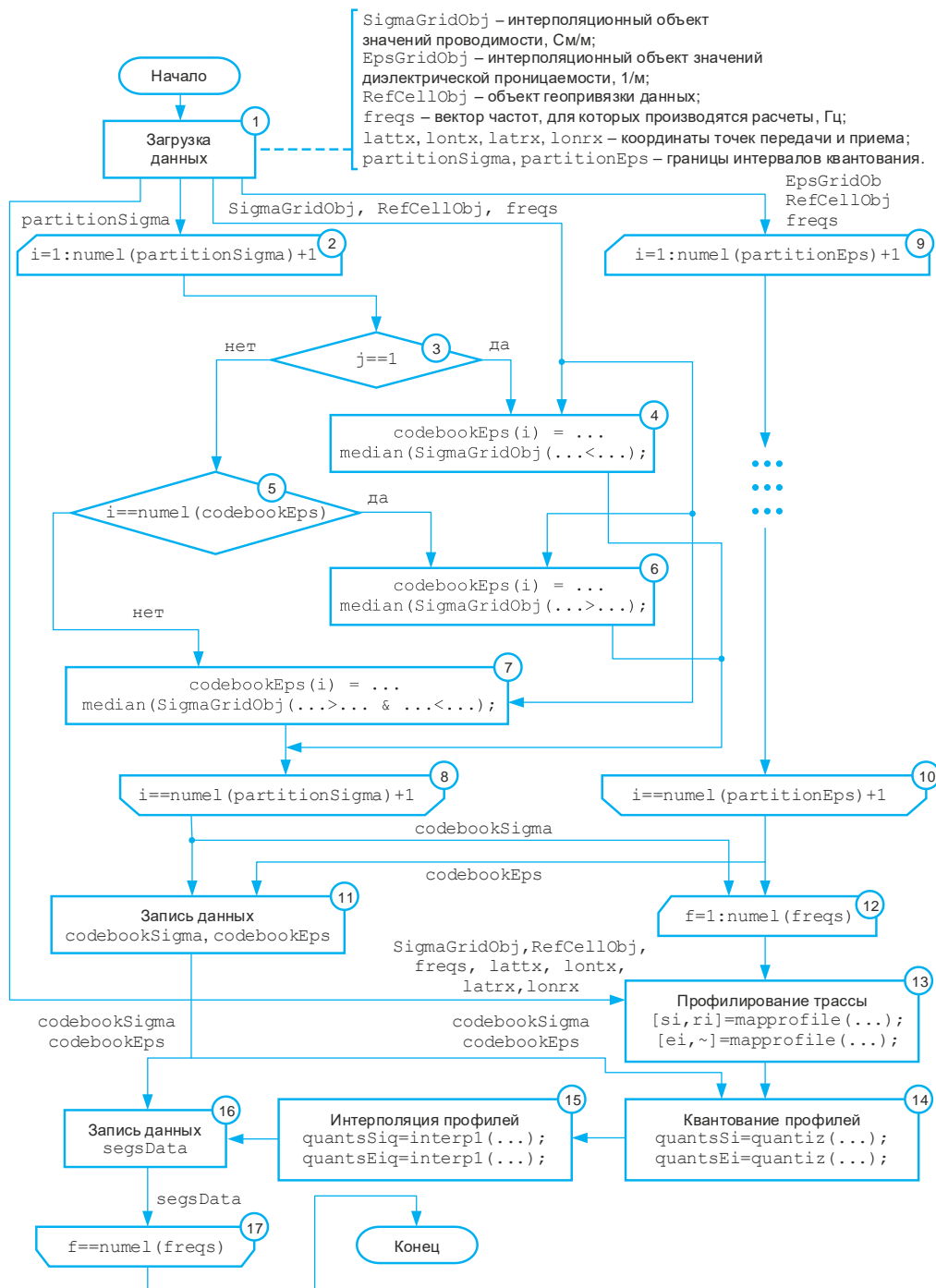


Рис. 2. Блок-схема методики
Fig. 2. Flowchart of the Technique

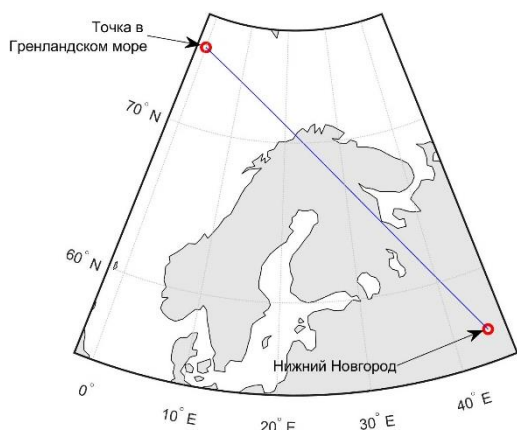


Рис. 3. Радиотрасса Нижний Новгород – Гренландское море
Fig. 3. Radio Path Nizhny Novgorod – Greenland Sea

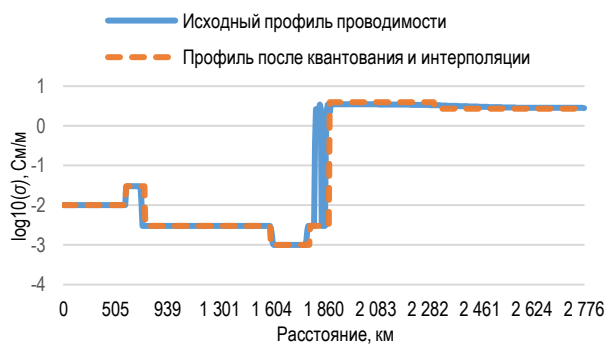


Рис. 4. Профили электрических параметров подстилающей поверхности
Fig. 4. Profiles of Underlying Surface Electric Parameters

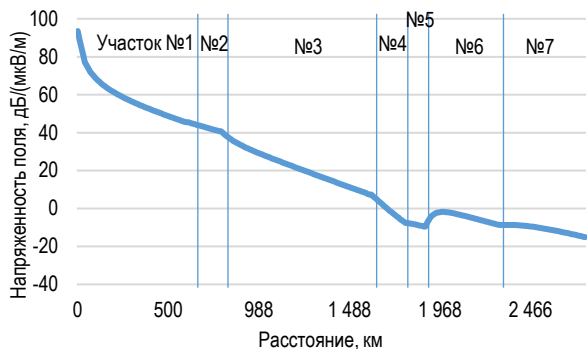


Рис. 5. График зависимости напряженности поля земной волны от расстояния
Fig. 5. Groundwave E-Field versus Distance Plot

Результаты расчетов для частоты 150 кГц графически отображены на рисунке 5, из которого видно, что для первых пяти участков наблюдается примерно равномерное затухание сигнала за исключением участка № 4, где значение проводимости наиболее низкое. После перехода трассы от континентальной части к морской (участки № 6 и № 7) виден эффект «восстановления» [16, 17], так как проводимость морской поверхности существенно выше, чем континентальной. Электрические параметры профиля показаны в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Горизонтальный профиль электрических параметров подстилающей поверхности на трассе Нижний Новгород – Гренландское море

TABLE 3. Horizontal Profile of Underlying Surface Electric Parameters on the Path Nizhny Novgorod – Greenland Sea Radio Path

Номер участка	Проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость, 1/м	Длина участка, км
1	0,01	8,3	607,5
2	0,03	12,8	170,6
3	0,003	5,4	820,1
4	0,001	3,9	196,3
5	0,003	14,3	93,5
6	3,94	76,4	418,2
7	2,69	78,7	469,7

Выводы

Таким образом, разработана методика автоматического профилирования электрических характеристик земной поверхности на трассе распространения радиоволн, которая позволяет получить горизонтальный профиль квантованных характеристик земной поверхности и использовать полученные данные для расчета напряженности поля земной волны. Расчеты напряженности поля земной волны являются составной частью комплексных вычислений для определения энергетических параметров радиотрассы скачковым методом [18]. Однако точный характер влияния прогнозных значений напряженности поля земной волны на суммарное поле в точке приема требует дополнительных исследований.

Методика также может быть использована для получения горизонтальных профилей радиотрассы с целью их использования в других расчетных методиках, основанных на волновом методе [19] и методах вычислительной электродинамики [20].

Практическая значимость полученной методики заключается в автоматизации процесса ввода исходных данных при прогнозировании энергетических параметров радиотрасс ОНЧ-диапазона. Все необходимые сведения для выполнения профилирования получают в ходе решения задачи прогнозирования напряженности поля пространственной (ионосферной) волны [12], являющейся обязательным этапом при поиске суммарного поля в точке приема, включающего пространственную и земную волны. Непосредственно профили электрических характеристик подстилающей поверхности строятся на базе цифровых карт [7, 8], но могут быть использованы и другие карты, например [11]. Еще один аспект практической значимости заключается в снижении нагрузки на оператора, выполняющего прогнозирование, и сокращении времени, затрачиваемого на решение данной задачи.

Список источников

1. Coleman C. *Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 296 p. DOI:10.1017/9781316798607
2. Gonzalez G. *Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods*. Boca Raton: CRC Press, 2022. 708 p.
3. 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
4. Froñ 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 Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 3531. DOI:10.3390/rs12213531
5. 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
6. 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
7. 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
8. Типикин А.А., Парафейник Д.В., Потапов Д.С. Результаты исследований по формированию цифровых картографических данных электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне СДВ // *Морской вестник*. 2023. № S1(16). С. 27–29. EDN:JDEEVY
9. Morgan R.R. World-wide VLF effective conductivity map. Report 8013F-1 Westinghouse Electric Corporation, 1968. 62 p.
10. Рекомендация МСЭ-R P.832-4 (07/2015) Мировой атлас проводимости почвы.
11. Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г., Адвокатов В.Р. Прогнозная карта геоэлектрических разрезов континентов земного шара // V Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (Омск, Российская Федерация, 07–09 октября 2019). Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2019. С. 17–24. DOI:10.33286/978-5-6041917-2-9.17-24. EDN:DKVXOV
12. Типикин А.А. Методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот на основе скачкового метода // *Информационно-управляющие системы*. 2023. № 5. С. 12–21. DOI:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21. EDN:FTXMCY
13. Кучмин Н.А., Никитин О.Р. Квантователи речевого сигнала // *The Scientific Heritage*. 2021. № 81-1(81). С. 46–50. DOI:10.24412/9215-0365-2021-81-1-46-50. EDN:WBHCVJ
14. Трубаков А.О., Селейкович М.О. Сравнение интерполяционных методов масштабирования растровых изображений // *Научно-технический сборник Брянского государственного университета*. 2017. № 1. С. 92–97. DOI:10.22281/2413-9920-2017-03-01-92-98. EDN:YHFCGF
15. Типикин А.А. Обобщённая методика расчёта напряжённости поля земной волны диапазона очень низких частот для трассы с произвольным количеством однородных участков // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2023. № 87. С. 21–28. DOI:10.21667/1995-4565-2024-87-21-28. EDN:NRQFAG
16. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Поле земной волны над протяженными неоднородными радиотрассами // *Журнал радиоэлектроники*. 2019. № 11. DOI:10.30898/1684-1719.2019.11.11. EDN:NASWEE
17. Рекомендация МСЭ-R P.368-9 (2007) Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц.
18. 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
19. Gasdia F., Marshall R.A. A New Longwave Mode Propagator for the Earth-Ionosphere Waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 69. Iss. 12. PP. 8675–8688. DOI:10.1109/TAP.2021.3083753
20. Marshall R.A., Wallace T., Turbe M. Finite-difference modeling of very-low-frequency propagation in the Earth-ionosphere waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65. Iss. 12. PP. 7185–7197. DOI:10.1109/TAP.2017.2758392

References

1. Coleman C. *Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 296 p. DOI:10.1017/9781316798607
2. Gonzalez G. *Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods*. Boca Raton: CRC Press; 2022. 708 p.
3. Bilitza D. IRI the international Standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*. 2018;16:1–11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018
4. Froñ 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 Sensing*. 2020;12(21):3531. DOI:10.3390/rs12213531
5. 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
6. 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
7. 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

8. Tipikin A.A., Parafejnik D.V., Potapov D.S. The Research Results on the Development of Digital Cartographic Data of the Electrical Characteristics of the Underlying Surface in the Very Low Frequency Band. *Morskoy vestnik*. 2023;S1(16):27–29. (In Russ.) EDN:JDEEVY
9. Morgan R.R. *World-wide VLF effective conductivity map*. Report 8013F-1. Morgan R.R. Westinghouse Electric Corporation, 1968. 62 p.
10. ITU-R Recommendation P.832-4. *World atlas of ground conductivities*. July 2015.
11. Bashkuev Yu.B., Angarkhaeva L.Kh., Buyanova D.G., Advokatov V.R. Predictive map of geoelectric sections of continents of the world. *Proceedings of the V International Scientific-Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications, 07–09 October 2019, Omsk, Russian Federation*. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ.; 2019. p.17–24. (In Russ.) DOI:10.33286/978-5-6041917-2-9.17-24. EDN:DKVXOV
12. Tipikin A.A. The technique of calculating the field strength of the ionospheric wave in the very low frequency band based on the wavehop method. *Information and Control Systems*. 2023;5:12–21. (In Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21. EDN:FTXMCY
13. Kuchmin N.A., Nikitin O.R. Quantizers for speech signal. *The Scientific Heritage*. 2021;81-1(81):46–50. (In Russ.) DOI:10.24412/9215-0365-2021-81-1-46-50. EDN:WBHCVJ
14. Trubakov A.O., Seleykovich M.O. Comparison of interpolation methods for raster images scaling. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*. 2017;1:92–97. (In Russ.) DOI:10.22281/2413-9920-2017-03-01-92-98. EDN:YHFCGF
15. Tipikin A.A. Generalized method to calculate field strength of ground wave in very low frequency band for a path with arbitrary number of homogeneous segments. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2024;87:21–28. (In Russ.) DOI:10.21667/1995-4565-2024-87-21-28. EDN:NRQFAG
16. Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Melchinov V.P. Field of the earth wave over long inhomogeneous radio paths. *Journal of Radio Electronics*. 2019;11. (In Russ.) DOI:10.30898/1684-1719.2019.11.11. EDN:NASWEE
17. ITU-R Recommendation P.368-9. *Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz*. 2007.
18. 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
19. Gasdia F., Marshall R.A. A New Longwave Mode Propagator for the Earth-Ionosphere Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021;69(12):8675–8688. DOI:10.1109/TAP.2021.3083753
20. Marshall R.A., Wallace T., Turbe M. Finite-difference modeling of very-low-frequency propagation in the Earth-ionosphere waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017;65(12):7185–7197. DOI:10.1109/TAP.2017.2758392


Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 24.05.2024.

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Информация об авторах:


ТИПИКИН
Алексей Алексеевич

кандидат технических наук, начальник отдела Научно-исследовательского института оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

 <https://orcid.org/0000-0002-0940-4285>


ПАХОТИН
Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

 <https://orcid.org/0000-0002-8499-8650>

ПОТАПОВ
Денис Сергеевич

младший научный сотрудник Научно-исследовательского института оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

 <https://orcid.org/0009-0008-2289-1576>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.