

Подход к решению обратной задачи восстановления электрических параметров диссипативной среды на радиоприемах земных волн большой протяженности по данным измерений напряженности поля

Бородулин Роман Юрьевич

доктор технических наук, доцент, Военная академия связи им. С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, borodulroman@yandex.ru

Леонюк Антон Сергеевич

кандидат технических наук, Военная академия связи им. С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, leonuck@yandex.ru

Ханжин Иван Владимирович

кандидат технических наук, Военная академия связи им. С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, zxx.zet@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: В военной сфере при подготовке и ведении боевых действий существенная роль при управлении войсками и оружием отводится системе связи. Ввиду непостоянства параметров ионосферы, оказывающей сильное влияние на планирование радиосвязи и ее качество, использование радиоприемных земных волн всегда сохраняет свою актуальность. Предлагается новый способ определения эффективных электрических параметров диссипативной среды на радиоприемах земных волн большой протяженности по действующему значению напряженности электрического поля в точке приема. **Постановка задачи:** повысить эффективность прогнозирования и проектирования линий радиосвязи земных волн большой протяженности. **Методы:** методы теории дифракции В.А. Фока для области геометрической тени и оптимизационный метод поиска решения. **Результаты:** разработан способ определения эффективных электрических параметров подстилающей среды на радиоприемах земных волн большой протяженности по действующему значению напряженности электрического поля в точке приема с учетом неоднородностей радиоприемных волн и сферичности поверхности Земли. Показана возможность определения электрических параметров подстилающей среды методом полного перебора. На основе анализа поставленной проблемы сформулированы цели, задачи и критерии оптимизации. Показано решение оптимизационной задачи с одной и несколькими переменными. Представлены численные расчеты, подтверждающие теорию. **Практическая значимость:** Разработанный способ позволяет совершенствовать методы дистанционного мониторинга электрических параметров Земли с целью прогнозирования и проектирования линий радиосвязи земных волн большой протяженности. **Обсуждение:** новизна предложенной постановки задачи состоит в том, что он позволяет учитывать сферичность поверхности Земли, а также чувствителен к определению относительной диэлектрической проницаемости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиоприемная земных волн; подстилающая среда; относительная диэлектрическая проницаемость; удельная электропроводность; энергетический расчет радиоприемных волн.

Введение

В современных условиях успех боевых действий определяется не только количеством, подготовкой войск и совершенством боевой техники, но и качеством управления ими. Повышение оперативности, непрерывности, устойчивости и скрытности управления войсками, силами и средствами достигается путем совершенствования структуры органов и пунктов управления, внедрения новых систем и комплексов автоматизации. В свою очередь это обуславливает повышение требований, предъявляемых к системе связи, которая должна гарантированно обеспечивать потребности управления войсками в любых условиях современного боя. Для обеспечения своевременной и достоверной радиосвязи необходимо комплексное использование радиоканалов различных диапазонов частот и механизмов распространения радиоволн.

Как правило, на стратегических направлениях наиболее вероятным для доведения сигналов (приказов) в связи с большой протяженностью радиолиний и необходимостью маневра предполагается использование радиолиний декаметрового диапазона и спутниковых систем. Ввиду непостоянства параметров ионосферы, оказывающей сильное влияние на планирование радиосвязи и ее качество, использование радиолиний земными волнами всегда сохраняет свою актуальность. Известно, что дальность связи при этом повышается пропорционально росту длины рабочей волны. Поэтому наряду с совершенствованием комплексов радиосвязи для обеспечения устойчивости системы связи необходимо проводить качественное планирование, выявляющее особенности распространения радиоволн на важных направлениях.

В основе решения многих задач, составляющих проблему устойчивости системы связи, лежит расчет энергетических параметров радиоканала, результатом которого является отношение мощности сигнала к мощности помех на входе соответствующего радиоприемного устройства.

Влияние поверхности Земли и неоднородностей атмосферы при распространении радиоволн обычно учитывается множителем ослабления W_t , показывающим степень изменения основной составляющей поля E_t на трассе по сравнению с полем в свободном пространстве E_0 на таком же расстоянии.

Множитель ослабления W_t зависит от эффективных электрических параметров ϵ' и σ Земли, ориентировочные обобщенные значения которых приведены в соответствующих источниках литературы [1-7]. Считать электрические параметры подстилающей среды постоянными вдоль трассы и в глубину ее некорректно; такая идеализация может привести к неточному определению дальности связи. Например, расчеты, проведенные на основе методик МККР для частоты $f = 200$ КГц (диапазон ДВ) показывают, что изменение электрических параметров подстилающей среды: $\epsilon' = 10 \dots 5$, $\sigma = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ см/м влечет за собой уменьшение энергетического баланса радиолинии, приводящее к снижению дальности связи вдвое при прочих равных условиях. Таким образом, определение электрических параметров подстилающей среды является актуальной задачей при обеспечении радиосвязи в интересах системы связи страны.

Обзор известных методик

Методы определения электрических параметров подстилающей среды разнообразны как по физико-математическим, так и по методическим основам. Они базируются на электродинамике и теории распространения радиоволн, что позволяет вывести интерпретацию результатов на количественный уровень. Исследование электрических свойств подстилающей среды является составной частью более широкого научного направления - распространение электромагнитных волн в слоистых средах. Основы его были заложены в трудах Л.М. Бреховских, Г.И. Макарова и В.В. Новикова, В.И. Дмитриева. Моделирование распространения электромагнитных волн базируется на методах расчета поля земной волны над слои-

сто-неоднородными импедансными структурами, предложенных и разработанных В.А. Фомом, Е.Л. Фейнбергом и Ю.К. Калининым продолжающих совершенствоваться и находящихся отражение в современных источниках литературы [8-14].

В последние годы развиваются радиоимпедансные методы исследования земной поверхности. В связи с этим становится актуальной задача достоверной и оперативной интерпретации данных радиоимпедансного зондирования. К числу наиболее сложных задач, возникающих на этапе количественной интерпретации экспериментальных кривых радиоимпедансных методов исследования, относится обратная задача – восстановление электрических параметров подстилающей среды (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' , удельная электропроводность σ).

Один из методов решения обратной задачи заключается в определении удельной электропроводности путем измерения ослабления напряженности поля вдоль трассы распространения (метод компарирования полей) [15]. Недостатками данного метода являются: применимость его исключительно для радиолиний малой протяженности, в которых не учитывается сферичность Земли; низкая чувствительность метода к определению относительной диэлектрической проницаемости, вносящей весомый вклад в ослабление напряженности поля на радиолиниях декаметрового и более высокочастотных диапазонов.

В статье [16] и патенте [17], рассмотрены альтернативные подходы решения обратной импедансной задачи восстановления электрических свойств слоистой среды по данным прямых измерений, основанные на статистическом методе. Выполнена интерпретация результатов измерений частотной зависимости поверхностного импеданса в диапазонах сверхдлинных, длинных и средних радиоволн.

Существуют методы определения комплексной диэлектрической проницаемости образцов грунта, проводимые в лабораторных условиях. Метод, описанный в [18] на начальном этапе подразумевает помещение исследуемого образца грунта в ячейку, представляющую собой отрезок коаксиальной линии, для измерения его параметров. В этом случае процедура измерения электрических параметров подстилающей среды на реальной радиолинии повлечет выполнение целого ряда мероприятий, среди неполного списка которых и наличие выездных лабораторий, и обеспечение определенных температурных условий, и огромное количество замеров, увеличивающееся пропорционально росту протяженности радиолинии.

Данные методы используются для точечного определения электрических параметров подстилающей среды, что не позволяет ими оперировать на трассах большой протяженности.

Рассмотренная в [19-21] методика позволяет ввести относительную комплексную эффективную диэлектрическую проницаемость, учитывающую неоднородность вертикального среза почвы. Однако информация о количестве слоев грунта и их электрических параметрах при этом считается априори известной. То есть возникает необходимость в получении такой информации одним из рассмотренных выше эксплуатационных способов.

Таким образом, возникает необходимость в совершенствовании методов определения электрических параметров подстилающей среды, а также построении новых моделей исследования комплексной диэлектрической проницаемости почв, в особенности при рассмотрении радиолиний земной волной большой протяженности.

Теоретическое обоснование предлагаемого подхода

В статье предлагается подход к натурному измерению множителя ослабления трассы W_T большой протяженности с последующим определением комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k .

Формула для вычисления поля вертикального диполя E_T в случае, когда приемник и передатчик расположены на земле, с учетом ее сферичности, имеет вид [15]:

$$E_T = \frac{300\sqrt{P \cdot 10^3}}{R \cdot 10^3} W_T, \text{ мВ/м}, \quad (1)$$

где W_T - множитель ослабления для сферической земли и показывает, во сколько раз поле диполя на поверхности поглощающей сферической земли отличается от поля диполя на поверхности плоской бесконечно проводящей земли. Его точное выражение имеет следующий вид:

$$W_T = \sqrt{-i\pi A \theta} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{-iA\theta t_s}}{t_s - q^2}, \quad (2)$$

где θ - угловое расстояние между приемником и передатчиком;
 t_s - корни уравнения $\omega(t)=q \omega'(t)$, $\omega(t)$ - функция Эйри [5];

$$A = \sqrt[3]{\frac{\pi a}{\lambda}} - \text{относительный радиус Земли;}$$

a – радиус Земли.

Параметр, характеризующий электрические свойства почвы (его роль аналогична роли комплексной диэлектрической проницаемости в плоской задаче):

$$q = \frac{A}{i\sqrt{\epsilon' - i60\lambda\sigma}}. \quad (3)$$

Амплитудное значение напряженности электрического поля, создаваемого излучателем в свободном пространстве, при известной мощности передатчика P_1 , подводимой к антенно-фидерному тракту равна:

$$E_0 = \frac{300\sqrt{P \cdot 10^3}}{R \cdot 10^3}.$$

После измерения амплитудного значения напряженности электрического поля в точке приема, нетрудно определить множитель ослабления на трассе:

$$W_T = \frac{E_T(R)}{E_0}. \quad (4)$$

Для относительных расстояний $\frac{R[\text{км}]}{\lambda^{1/3}[\text{м}]} \geq 23,5$ ряд в выражении (2) быстро сходится, и

можно ограничиться его первым членом. Тогда выражение для множителя ослабления принимает вид:

$$|W_T| \approx \sqrt{\pi A \theta} \cdot \frac{e^{A \theta \operatorname{Im} t_1}}{|t_1 - q^2|}. \tag{5}$$

С учетом переменной A и радиуса Земли $a = 6370$ км, получим:

$$W_T = 0,365 \sqrt{\frac{R[\text{км}]}{\lambda^{1/3}[\text{М}]}} \frac{\exp\left(0,0425 \frac{R[\text{км}]}{\lambda^{1/3}[\text{М}]} \operatorname{Im} t_1\right)}{|t_1 - q^2|}. \tag{6}$$

Комплексное значение корня $t_1 = \operatorname{Re} t_1 + i \operatorname{Im} t_1$ определяется в зависимости от абсолютного значения q по приближенным формулам:

$$t_1(q) = 0,51 - i0,88 - (0,25 + i0,75) \cdot |q|, \quad q \leq 0,5 \tag{7}$$

$$t_1(q) = 1,17 - i2,03 + \frac{0,71(1 + i)}{|q|}, \quad q \geq 2 \tag{8}$$

На средних и более длинных волнах тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ на несколько порядков превышает единицу, например для верхней границы СВ-диапазона ($\lambda = 2000$ м) величина $60\lambda\sigma$ около 2500...5000, что значительно больше значений, которые принимает относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon' = 1 \dots 10$. Следовательно, при расчете W_T значениями ϵ' можно пренебречь и вместо выражения (3) использовать одну из известных аналитических формул:

$$q = \frac{35e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\lambda^{5/6} \sigma^{1/2}}. \tag{9}$$

Величина W_T может быть определена при использовании выражения (4). Амплитудное значение напряженности электрического поля в точке приема может быть получено, например, при помощи радиотехнических систем дальней навигации (РСДН), предназначенных для определения местоположения воздушного средства на расстоянии до нескольких тысяч километров от наземных станций или в пределах всего земного шара. РСДН работают в диапазонах длинных и сверхдлинных волн, где требуемая дальность действия обеспечивается с помощью сигналов поверхностных волн.

Учитывая, что имеются строгие аналитические зависимости W_T от электрических параметров подстилающей среды, решим обратную задачу, в которой комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ_k подстилающей среды определяется по измеренному значению множителя ослабления W_T . Выше было показано, что в диапазонах СДВ, ДВ и СВ реальной частью ϵ_k - относительной диэлектрической проницаемостью, можно пренебречь по отношению к удельной электропроводности. Проведем анализ выражения (6).

Комплексное значение корня t_1 и удельная электропроводность σ зависят от q , кроме того в выражении присутствуют квадратный корень и модуль. Данные факты серьезно усложняют математические преобразования, связанные с выводом σ .

Удельная электропроводность σ принимает конечные значения, поэтому непрерывная вариационная задача может быть вполне заменена дискретной и один из методов оптимизации одной переменной (кубическая интерполяция) [20] может быть применен для поиска экстремумов целевой функции.

Рассмотрим основные этапы способа определения эффективных электрических параметров подстилающей среды на радиолиниях земных волн большой протяженности.

1. Ввод исходных данных:

постоянная константа – скорость света c ;

расстояние между приемником и передатчиком R , в пределах которого необходимо определить эффективные электрические параметры подстилающей среды;

радиус Земли a ;

измеренное (заданное) значение множителя ослабления W_T .

2. Выбор метода оптимизации для поиска оптимального решения:

значения удельной электропроводности σ реальных подстилающих сред колеблются от 10^{-5} до 20 См/м, причем нижняя граница имеет место при рассмотрении снежного покрова, либо мерзлого грунта, о верхней границе можно говорить при работе, например, с морской водой. Если для обеспечения радиосвязи планируется использование декаметрового диапазона, амплитудное значение напряженности электрического поля может быть измерено посредством специальных цифровых приемных устройств, тогда в качестве второго неизвестного необходимо выбрать вещественную часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k . Это связано с тем, что даже для нижней границы КВ-диапазона ($\lambda=100$ м) величина $60\lambda\sigma$ около 10...50, что соизмеримо со значениями, которые принимает относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' 1...10, и тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ будет колебаться в пределах 1...5. В этом случае расчет параметра q необходимо осуществлять по формуле (3). Изменение σ с шагом 1×10^{-5} См/м и ϵ' с шагом 0,1 в указанных выше пределах вполне подвластно современным ЭВМ. С учетом вышеизложенного, в качестве метода оптимизации выбран метод полного перебора.

3. Постановка оптимизационной задачи:

формулировка целей и задач оптимизации;

определение критериев оптимизации;

ввод переменных;

ввод ограничений;

формирование условий.

4. Решение оптимизационной задачи.

Формулировка целей и задач оптимизации

Целью оптимизации является поиск значений σ или σ и ϵ' , удовлетворяющих минимуму целевой функции: $F(W) = |W_T(\text{расчетное}) - W_T| \rightarrow \min$.

Для получения результатов в процессе решения конкретной инженерной задачи методом полного перебора необходимо точно задать переменные, в качестве которых могут выступать удельная электропроводность σ и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' , а также границы изменения их значений. Затем определить критерий, на основе которого можно произвести анализ вариантов с целью достижения рационального результата и построить модель, отражающую взаимосвязи между переменными.

Определение критериев оптимизации

Критерием оптимизации выберем расчетное значение множителя ослабления. Потребуем, чтобы $|W_T(\text{расчетное}) - W_T| \rightarrow 0$.

Ввод переменных и пределов их изменения

Переменной оптимизации является σ или σ и ε' . Зададим пределы изменения введенных переменных: $1 \cdot 10^{-5} \leq \sigma \leq 20$ с шагом $\Delta = 1 \cdot 10^{-5}$ См/м; $1 \leq \varepsilon' \leq 10$ с шагом $\Delta = 0,1$. Условие оптимизационной задачи примет вид:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{W_{Ti}(\text{расчетное})}{n} - W_T \rightarrow H, \quad (10)$$

$$H = \begin{cases} (\sigma) | 1 \cdot 10^{-5} \leq \sigma \leq 20; \\ (\varepsilon) | 1 \leq \varepsilon' \leq 10; \end{cases} | W_T(\text{расчетное}) - W_T | \rightarrow \min; \quad (11)$$

где n – количество отсчетов (шагов) оптимизации.

Решение оптимизационной задачи

Будем считать множитель ослабления W_T известным или заданным, также как начальные и конечные значения σ или σ и ε' . На каждом шаге вычислений производится расчет параметра q согласно выражениям (9) или (3), в зависимости от диапазона частот, комплексного значения корня t_1 по формулам (7) или (8) и множителя ослабления, используя (6). В случае если $0,5 \leq q \leq 2$ необходимо воспользоваться графиком [21]. На каждом шаге вычислений полученное (расчетное) значение $W_T(\text{расчетное})$ сравнивается с заданным W_T , то есть определяется минимум целевой функции $F(W) = | W_T(\text{расчетное}) - W_T | \rightarrow \min$. Номер итерации с остатком, наиболее близким к нулю, определяет значение σ или σ и ε' .

Численные расчеты, подтверждающие теорию

Для апробации предложенного способа рассмотрим радиолинию протяженностью $R = 1200$ км и три предельных случая: $f = 3$ КГц, $f = 30$ КГц и $f = 300$ КГц. Определим электрические параметры подстилающей среды по известному (заданному) W_T . Для $f = 3$ КГц, $W_T = 0,685$, $\sigma = 100$ мСм/м, что соответствует очень влажной почве. Для $f = 30$ КГц, $W_T = 0,128$, $\sigma = 20$ мСм/м, что соответствует влажной почве. Для $f = 300$ КГц, $W_T = 2,69 \cdot 10^{-4}$, $\sigma = 3$ мСм/м, что соответствует сухой почве. На рисунке 1 представлен график сходимости целевой функции $F(W)$ для случая $f = 3$ КГц. На графике наглядно продемонстрировано, что процесс оптимизации закончился на 1796 итерационном шаге, при котором целевая функция достигла наиболее близкого к нулю значения.

Как было показано ранее в КВ-диапазоне наряду с σ весомый вклад в ослабление величины напряженности поля вносит относительная диэлектрическая проницаемость ε' . Продемонстрируем пример решения оптимизационной задачи относительно двух переменных σ и ε' на радиолинии протяженностью 100 км при $f = 5$ МГц. $W_T = 2,2855 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon' = 4,2$, $\sigma = 0,0015$ См/м, что соответствует сухой почве.

Заключение

Новизна способа, рассмотренного в данной статье, заключается в том, что он позволяет учитывать сферичность поверхности Земли, а также чувствителен к определению относительной диэлектрической проницаемости ε' . Данный способ может применяться в рамках дистанционного мониторинга электрических параметров подстилающей среды с потерями в реальном времени. По результатам такого отслеживания (наблюдения) появится возможность прогнозирования характеристик направленности антенн военных радиостанций, дове-

денного до конкретных практических предложений по обеспечению радиосвязи, в том числе и ионосферной волной.

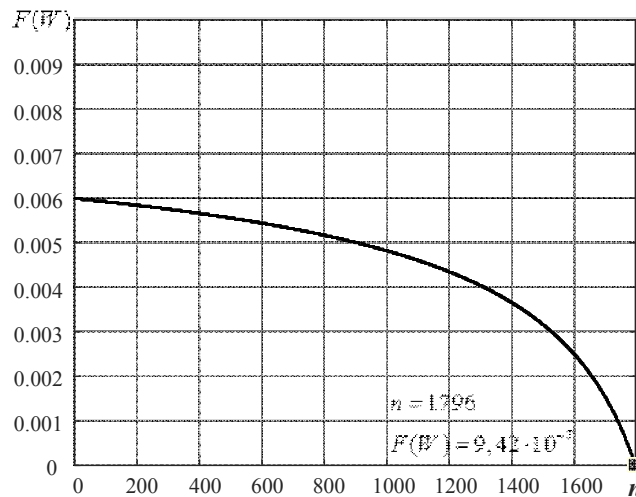


Рис. 1. График сходимости целевой функции

Для оценки точности определения электрических параметров подстилающей среды с потерями предполагается построение компьютерных моделей распространения земных радиоволн на основе численных методов электродинамики.

При практической реализации способа возникает ряд трудностей. Первая состоит в определении мощности, подводимой к антенне и излучаемой ей с необходимой точностью. Вторая заключается в необходимости определения и учета характеристики направленности передающей антенны, отличной от круговой, ввиду расположения антенны в реальных условиях. Третья связана с использованием приемной антенны, способной «отсекать» ионосферную волну, вносящую вклад в значение напряженности поля в точке приема. Кроме того, приемная антенна должна реагировать на горизонтальную продольную составляющую напряженности поля, увеличивающуюся с ростом частоты (уменьшением удельной электропроводности подстилающей среды).

Литература

1. *Apaydin G., Sevgi L.*, Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling. John Wiley & Sons, 2017.
2. *Volkova A. A., Malevich E. S.*, “Modelling Forest Vegetation by Single Trees Using Parabolic Equation Method,” 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Pp. 1–5, 2019.
3. *Cadette P., Linwood W.*, “Impact of Dielectric Variability on Site Specific Urban Propagation Loss Calculations,” 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, USA, 2019, Pp. 1-4.
4. *Mohtashami V., Shishegar A. A.*, “Sensitivity analysis of ray tracing to the geometrical description of the environment,” IET Microwaves, Antennas & Propag., Vol. 10, Iss. 11, Pp. 1225–1234, 2016.
5. *Sevgi L.*, “Groundwave Modeling and Simulation Strategies and Path Loss Prediction Virtual Tools,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 6, Pp. 1591–1598, 2017.

6. *Kurner T., Cichon D. J., Wiesbek W.*, “Concepts and results for 3D digital terrain based wave propagation models-An overview,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 11, Pp. 1002-1012, July 2021.
7. *Levy M. F.*, *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London, U.K.: IEE Press, 2017.
8. *Hu Y., Fang D., Wang Y., Zhong.* *Electromagnetic waves in multilayered generalized anisotropic media*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2018. Vol. 56. No 10. Pp. 5758-5766.
9. *Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S.* *Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method*. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2019. Vol. 67. No. 4. Pp. 2167-2175.
10. *Parada D. A., Rego C. G., Batista C. G., Ramos G. L.* *A comparative study between SSPE methods and a HO-FDTD algorithm for EM propagation over lossy terrains* 12th European Conference on Antennas and Propagation. Pp. 1-3, 2018.
11. *Wang J., Li B.* *Electromagnetic Fields Generated above a Shallow Sea by a Submerged Horizontal Electric Dipole [J]*. *IEEE Transaction on Antenna & Propagation*. 2017. 65(5). 2707-2712.
12. *Wang D, Xi X, Pu Y, Liu J, Zhou L.* *Parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain*. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2016. Vol. 15. Pp. 734–737.
13. *Wang D, Xi X, Pu Y, Liu J, Zhou L.* *LF Radio Wave Prediction at Short Ranges With High Propagation Angles Over Irregular Terrain*. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*. 2017. Vol. 16. Pp 732-735
14. *Jo T., Shimasaki H.* *Two-dimensional models of a tree in the propagation of 920-MHz band radio wave*. *IEICE 2018 Society Conference*. P.13, Sept. 2018.
15. *Barrios A. E.*, “A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 42, No. 1, Pp. 90–98, Jan. 2018.
16. *Баикуев Е. Б., Дембелов М. Г., Поляков М. А., Пылаев А. А.* *Определение электрических параметров слоистой подстилающей среды по результатам радиогеофизических измерений // Радиотехника и электроника*. 2015. № 6. С 560-565.
17. *Проворотов Г. Ф., Щеголеватых А. С.* *Способ измерения параметров подстилающей среды и устройство для его осуществления// Патент России № 2671299*. 2018. Бюл. № 29.
18. *Варнаков С. А., Суслов К. Н., Яценко А. С.* *Особенности определения диэлектрической проницаемости методом оптимизации функций// Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции: сб. ст/ ОНИИП. Омск., 2021. С.137-139.*
19. *Сосунов Б. В., Бородулин Р. Ю., Леонюк А. С., Николаев В. И.* *Методика расчета эффективной диэлектрической проницаемости многослойной среды. Теория и техника радиосвязи*. 2016. № 3. С 79-84.
20. *International Telecommunication Union.* “The concept of transmission loss for radio links.” *Recommendation ITU-R P.341-6*, Sep. 2016.
21. *Dockery G. D.*, “Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 10, Pp. 1464–1470, Oct. 2018.

METHOD FOR DETERMINING EFFECTIVE ELECTRICAL PARAMETERS OF A DISSIPATIVE MEDIUM ON LONG EXTENSION GROUND WAVES RADIO LINES

ROMAN Yu. BORODULIN

PhD, Docent, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, borodulroman@yandex.ru

ANTON S. LEONYUCK

PhD, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, 1leonuck@yandex.ru

IVAN V. KHANZHIN

PhD, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, 1leonuck@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction: In the military sphere, in the preparation and conduct of hostilities, a significant role in command and control of troops and weapons is assigned to the communications system. Due to the volatility of the parameters of the ionosphere, which has a strong influence on the planning of radio communication and its quality, the use of radio links by ground waves always remains relevant. A new method is proposed for determining the effective electrical parameters of a dissipative medium on long-range ground-wave radio links from the effective value of the electric field strength at the receiving point. **Problem statement:** to improve the efficiency of forecasting and designing long-distance ground-wave radio links. **Methods:** methods of diffraction theory V.A. Fock for a region of geometric shadow and an optimization method for finding a solution. **Results:** a method has been developed for determining the electrical parameters of the underlying medium on long-range ground-wave radio links using the effective value of the electric field strength at the receiving point, taking into account the inhomogeneities of the radio links and the sphericity of the Earth's surface. The possibility of determining the electrical parameters of the underlying medium by the exhaustive enumeration method is shown. Based on the analysis of the problem posed, goals, objectives and optimization criteria are formulated. The solution of the optimization problem with one and several variables is shown. Numerical calculations are presented that confirm the theory. **Practical significance:** The developed method makes it possible to improve the methods of remote monitoring of the electrical parameters of the Earth in order to predict and design long-range ground-wave radio communication lines. **Discussion:** The novelty of the proposed formulation of the problem lies in the fact that it allows taking into account the sphericity of the Earth's surface, and is also sensitive to the determination of the relative permittivity.

Keywords: ground wave radio link; underlying medium; relative permittivity; electrical conductivity; energy calculation of the radio link.

REFERENCES

1. Apaydin G., Sevgi L., Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling. John Wiley & Sons, 2017.
2. Volkova A. A., Malevich E. S., "Modelling Forest Vegetation by Single Trees Using Parabolic Equation Method," 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Pp. 1–5, 2019.
3. Cadette P., Linwood W., "Impact of Dielectric Variability on Site Specific Urban Propagation Loss Calculations" 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, USA, 2019, Pp. 1-4.
4. Mohtashami V., Shishegar A. A., "Sensitivity analysis of ray tracing to the geometrical description of the environment" IET Microwaves, Antennas & Propag., vol. 10, Iss. 11, Pp. 1225–1234, 2016.
5. Sevgi L., "Groundwave Modeling and Simulation Strategies and Path Loss Prediction Virtual Tools" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 6, Pp. 1591–1598, 2017
6. Kurner T., Cichon D. J., Wiesbek W., "Concepts and results for 3D digital terrain based wave propagation models-An overview" IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 11, Pp. 1002-1012, July 2021.
7. Levy M. F., *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London, U.K.: IEE Press, 2017.
8. Hu Y., Fang D., Wang Y., Zhong. *Electromagnetic waves in multilayered generalized anisotropic media*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018. Vol. 56. No 10. Pp 5758-5766.
9. Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S. *Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2019. Vol. 67. No. 4. Pp. 2167-2175.
10. Parada D. A., Rego C. G., Batista C. G., Ramos G. L. *A comparative study between SSPE methods and a HO-FDTD algorithm for EM propagation over lossy terrains 12th European Conference on Antennas and Propagation*. Pp. 1-3, 2018.
11. Wang J., Li B. *Electromagnetic Fields Generated above a Shallow Sea by a Submerged Horizontal Electric Dipole [J]*. IEEE Transaction on Antenna & Propagation. 2017. 65(5). 2707-2712.
12. Wang D, Xi X., Pu Y., Liu J., Zhou L. *Parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain*. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2016. Vol. 15. Pp. 734–737.
13. Wang D, Xi X., Pu Y., Liu J., Zhou L. *LF Radio Wave Prediction at Short Ranges With High Propagation Angles Over Irregular Terrain*. IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS. 2017. Vol. 16. Pp 732-735
14. Jo T., Shimasaki H. *Two-dimensional models of a tree in the propagation of 920-MHz band radio wave*. IEICE 2018 Society Conference. P.13, Sept. 2018.
15. Barrios A. E., "A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 42, No. 1, Pp. 90–98, Jan. 2018.
16. Bashkuev E. B., Dembelov M. G., Polyakov M. A., Pylaev A. A. *Determination of the electrical parameters of a layered underlying medium based on the results of radiogeophysical measurements*. Radio engineering and electronics. 2015. Vol. 6. Pp. 560-565.
17. Provorotov G. F., Shchegolevatykh A. S. *Sposob izmereniya parametrov podstilyayushchey sredy i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya [A method for measuring the parameters of the underlying environment and a device for its implementation]*. Patent Russia, No. 2671299. 2018.
18. Varnakov S. A., Suslov K. N., Yashchenko A. S. *Osobennosti opredeleniya dielektricheskoy pronitsayemosti metodom optimizatsii funktsiy [Features of determining the dielectric permittivity by the method of optimizing functions]*. Tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference]. Omsk, 2021. Pp. 137-139 (in Russian).
19. Sosunov B. V., Borodulin R. YU., Leonyuk A. S., Nikolayev V. I. *Method for calculating the effective permittivity of a multilayer medium*. Theory and Technology of Radio Communication. 2015. Vol. 3. Pp. 79–84.

20. International Telecommunication Union. "The concept of transmission loss for radio links" Recommendation ITU-R P.341-6, Sep. 2016.
21. Dockery G. D., "Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 10, Pp. 1464–1470, Oct. 2018.