

УДК 621.371. + 550.837.7

## **ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ ПРИ ПРИЕМЕ С БОРТА САМОЛЕТА**

М.Г. Дембелов, Ю.Б. Башкуев  
Институт физического материаловедения СО РАН  
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
[mdembelov@yandex.ru](mailto:mdembelov@yandex.ru)

*Рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты влияния высоты приема над земной поверхностью сигналов в километровом диапазоне радиоволн. Приведена формула для расчета функции ослабления при приеме на высоте. Результаты оценки влияния электрических неоднородностей на распространение радиоволн показали хорошую сходимость с расчетами.*

*Ключевые слова: функция ослабления, поверхностный импеданс, высота приема сигнала*

## **A FIELD OF THE VERTICAL ELECTRICAL DIPOLE UNDER RECEPTION ON A BOARD OF AIRCRAFT**

M.G. Dembelov, Yu.B. Bashkuev  
Institute of the physical material sciences of SB RAS  
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6  
[mdembelov@yandex.ru](mailto:mdembelov@yandex.ru)

*Theoretical and experimental results of influence of the height over the Earth's surface of signals in the kilometer range of radio waves are considered. A formula for calculation of an attenuation function for reception on a height is submitted. Results of influence changes of electrical inhomogeneities on a propagation of radio waves show a good agreement with calculations.*

*Key words: an attenuation function, surface impedance, height of the signal reception*

### **Введение**

Практический интерес к исследованиям распространения радиоволн с учетом высоты приема сигналов вызван требованиями обеспечения качества работы радиотехнических систем навигации, пеленгации и управления воздушным движением, особенно в высоких широтах. Существенный интерес представляет задача передачи дифференциальных поправок навигационных спутниковых систем с использованием СВ-радиомаяков (283-325 кГц) с радиусом рабочей зоны действия до 500 км. Значимость исследований возрастает в связи с освоением природных ресурсов Северного Ледовитого океана и проведением ледовой разведки Северного морского пути с использованием летательных аппаратов. Исследования позволяют оценить влияние вечной мерзлоты на качество передачи и приема радиосигналов для связи и навигации.

При решении задачи о поле расположенного на Земле вертикального электрического диполя будем пренебрегать переотражениями от всех неоднородностей. При этом потенциал Дебая будет удовлетворять приближенному граничному импедансному условию, в том числе для рельефной трассы.

## 1. Функция ослабления при приеме на высоте

Для численного решения задачи о распространении земной волны над однородной сферической поверхностью Земли при приеме на высоте удобно использовать представление в виде ряда нормальных волн [1]. Для расчета функции ослабления над неоднородными трассами в настоящее время наиболее обоснованным является метод численного решения интегрального уравнения [2]. Алгоритм решения, предложенный в работе [3], исходит из одномерного интегрального уравнения, полученного на основе функции Грина для потенциала Дебая в свободном пространстве, когда источник и приемник находятся на поверхности Земли.

Рассмотрим сферическую систему координат с началом в центре Земли, полярная ось проходит через источник. Пусть потенциал Дебая  $U$  удовлетворяет волновому уравнению [4] и, выбирая функцию Грина, можно написать для  $U$  интегральное уравнение:

$$U(r_0, h) = \frac{P_0}{4\pi\epsilon_0} \varphi(r_0, h) + \frac{1}{4\pi} \int_S \left[ U(r_1, 0) \frac{\partial \varphi(r_2, h)}{\partial n} - \varphi(r_2, h) \frac{\partial U(r_1, 0)}{\partial n} \right] dS, \quad (1)$$

где  $P_0$  – полный дипольный момент источника;  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $S$  – площадь интегрируемого участка на Земле, которая участвует в отражении поля;  $r_0$  – расстояние от источника до приемника;  $r_1$  – расстояние от источника до точки интегрирования;  $r_2$  – расстояние от точки интегрирования до точки приема;  $\varphi(r_2, h)$  – функция Грина с учетом высоты приема. Пусть на поверхности Земли компонента электрического поля  $E$  удовлетворяет граничному условию вида  $\left. \frac{\partial E}{\partial n} \right|_S = -ik\delta E$ , где  $z$  –

вертикальная координата;  $\delta$  – неоднородный по площади поверхностный импеданс. Считаем, что данное граничное условие совпадает с граничным условием для потенциала Дебая  $U$ .

В качестве функции Грина выберем функцию в виде:

$$\varphi(r_2, h) = \frac{e^{ikr_2}}{r_2} + \frac{e^{ikr'_2}}{r'_2} \quad (2)$$

где  $r'_2$  – расстояние от зеркальной от поверхности Земли точки приема до точки интегрирования. Подставляя (2) в уравнение (1), можно перейти от потенциала Дебая к функции ослабления с помощью известных соотношений [4]. Предполагая выполнимыми условия перехода от двухмерной модели радиотрассы к одномерной с учетом изменения свойств подстилающей среды только вдоль линии «источник-приемник» и применяя схему асимптотического интегрирования по поперечной координате, получаем интегральное уравнение для функции ослабления с учетом приема на высоте  $h$ :

$$W(D, h) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{r_0}{r'_0} e^{ik(r'_0 - r_0)} \right] + i \sqrt{\frac{ikD}{8\pi}} \int_0^D W(x) \left[ \delta(x) + \frac{1}{ik\varphi_2} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right] \times \\ \times \left[ 1 + \frac{r_2}{r'_2} e^{ik(r'_2 - r_2)} \right] e^{ik(r_1 + r_2 - r_0)} \frac{dx}{\sqrt{x(D-x)}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \frac{1}{ik\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \left[ \frac{\partial r_2}{\partial n} + \frac{r_2}{r'_2} \frac{\partial r_2}{\partial n} e^{ik(r'_2 - r_2)} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{r_2}{r'_2} e^{ik(r'_2 - r_2)} \right]^{-1}.$$

Здесь  $k = \frac{\omega}{c}$  – волновое число в вакууме;  $x$  и  $D$  – расстояния вдоль поверхности Земли между источником и точкой интегрирования и между источником и точкой приема соответственно.

Для численного интегрирования уравнения (3) используется алгоритм, основанный на методе конечных сумм. На начальном ровном участке трассы функция ослабления рассчитывается по классическим функциям Зоммерфельда. Если в этом интегральном

уравнении принять высоту приема равной нулю, то уравнение (3) сводится к уравнению Хаффорда [2].

## 2. Численные и экспериментальные результаты

По интегральному соотношению (3) составлены алгоритм и программа расчета функции ослабления  $W(D, h)$ . Выполнены сравнительные расчеты по ряду нормальных волн (ряд Фока) [1] и интегральному уравнению (3) для случая однородной по импедансу гладкой сферической поверхности. В табл. 1 приведены значения модуля и аргумента функции ослабления, рассчитанные по этим формулам на частоте 200 кГц для радиотрассы с однородными параметрами  $\epsilon=20$ ,  $\sigma=10^{-2}$  См/м при приеме на высотах 1 км и 5 км. Сопоставление приведенных в табл. 1 значений с расчетами по ряду Фока показывает, что расхождение рассчитанных разными методами функций  $W$  составляет по модулю менее 6.5%, а по фазе менее 0.1 радиан.

Таблица 1

$R$ , км	$ W $	$\arg W$ , рад.	$ W _{\text{Фок}}$	$\arg W_{\text{Фок}}$ , рад.
<u><math>h=1</math> км</u> 200	0.629	1.33	0.633	1.32
500	0.295	2.68	0.302	2.65
<u><math>h=5</math> км</u> 200	0.581	1.3	0.603	1.32
500	0.273	2.62	0.29	2.53

В районе п. Черский (Чукотский п-ов) проведено радиокомпарирование на частоте 257 кГц с борта самолета при полете на постоянных высотах 1000 метров и 100 метров над гористой трассой Черский-Певек. Радиостанция излучала электромагнитное поле вертикальной поляризации, распространяющееся в дневное время земной волной. Рельеф трассы - гористый, абсолютные отметки гор достигают 700 метров. Протяженность трассы составила около 100 км, пять импедансных участков по данным измерений на местности и с учетом их распределения согласно картам геоэлектрических разрезов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Импедансные участки, км	$ \delta $	$\arg \delta$ , градусы
$R = 0-5$	0.063	- 76
$R = 5-10$	0.106	- 68
$R = 10-27$	0.134	- 40
$R = 27-42$	0.106	- 68
$R = 42-100$	0.135	- 54

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты и рассчитанные по уравнению (3) значения модуля функции ослабления для радиотрассы Черский-Певек при приеме сигналов на высоте 1000 и 100 метров над уровнем земной поверхности. Отличие измеренных значений ослабления поля находится в среднем в пределах 20% относительно рассчитанных значений на обеих высотах полетов. Близость расчетов и измерений показывает вполне приемлемую модель трассы распространения для прогнозирования поля на разных высотах приема при хорошо подобранных электрических свойствах радиотрассы.

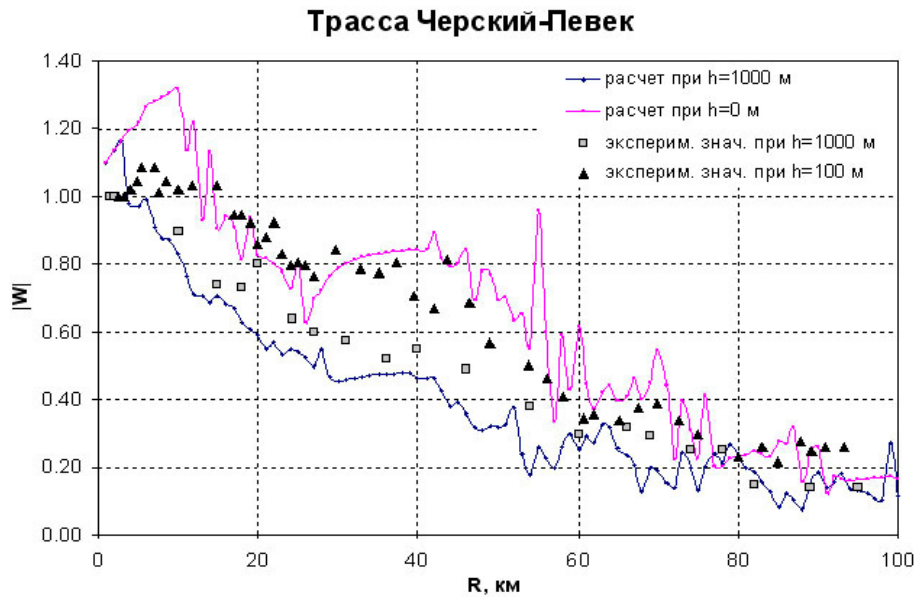


Рис. 1. Графики измеренных и расчетных значений модуля функции ослабления на разных высотах приема сигналов для трассы Черский-Певек.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №11 и гранта РФФИ-Сибирь № 12-02-98002.

### Библиографические ссылки

1. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространение электромагнитных волн / М.: Советское радио, 1970. 519 с.
2. Hufford G.A. An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface. // *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 9, pp. 391-404.
3. Проскурин Е.П., Пылаев А.А., Тихомиров Н.П., Штейнберг А.А. Распространение радиоволн над электрически и геометрически неоднородными трассами // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: Изд-во ЛГУ. 1981. Вып.18. С. 171-183.
4. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / М.: Физматлит, 1999. 496 с.

### References

1. Fock V.A. *Problemy difrakcii i rasprostranenie elektromagnitnyh voln*. M: Sovetskoye radio, 1970. 519p.
2. Hufford G.A. *An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface* // *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 9, pp. 391-404.
3. Proskurin E.P., Pylayev A.A., Tikhomirov N.P., Shteinberg A.A. *Problemy difrakcii i rasprostranenie voln*, 1981, no. 18, pp. 171-183.
4. Feinberg E.L. *Rasprostranenie radiovoln vdol' zemnoy poverhnosti*, M: Fizmatlit, 1999. 496p.