

*Эм Артем Александрович
аспирант кафедры Приборостроения
Дальневосточный Федеральный Университет
РФ, г. Владивосток*

АНАЛИЗ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКЕ

***Аннотация:** проведен анализ точечного источника электромагнитных волн для трех случаев:*

- источник расположен в свободном пространстве;*
- источник вблизи слоя льда;*
- источник расположен внутри слоя льда.*

Анализ проведен в соответствии с математической моделью, основанной на направленных функциях Грина с неоднородными граничными условиями по угловой координате.

***Ключевые слова:** анализ волновых полей; граница раздела сред; направленная функция Грина.*

***Abstract:** the analysis of a point source of electromagnetic waves is carried out for three cases:*

- the source is located in free space;*
- a source near the ice layer;*
- the source is located inside the ice layer.*

The analysis was carried out in accordance with a mathematical model based on directed Green's functions with inhomogeneous boundary conditions along the angular coordinate.

***Key words:** analysis of wave fields; interface between media; directed Green's function.*

Введение: Электромагнитные волны являются одними из наиболее быстрых переносчиков энергии и информации, поэтому анализ электромагнитных полей антенн является важной задачей в проектировании приемо-передающих систем. Большинство традиционных методов рассматривают распространение плоских волн через плоские границы раздела однородных сред [2, 4, 5]. Такое приближение ограничивает применимость и снижает точность расчетов, так как однородные среды и плоские поверхности в природе встречаются крайне редко.

Функции Грина с граничными условиями неоднородными по углу позволяют рассмотреть сложную поверхность как совокупность плоских, что увеличивает возможности применения традиционных методов[1].

Математическая модель: Рассмотрим следующий ряд задач: нужно рассчитать поле точечного направленного источника электромагнитных волн, расположенного:

- 1) в свободном пространстве (Рисунок 1);
- 2) вблизи слоя льда (Рисунок 2);
- 3) внутри слоя льда (Рисунок 3).

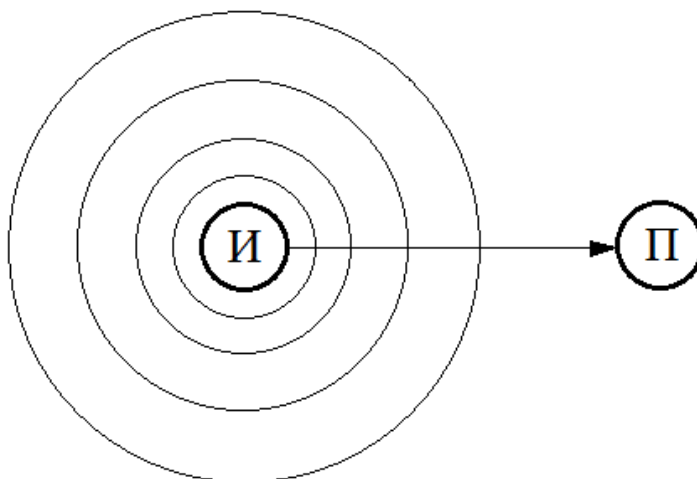


Рисунок 1. Поле точечного источника в свободном пространстве. И-источник, П-приемник.

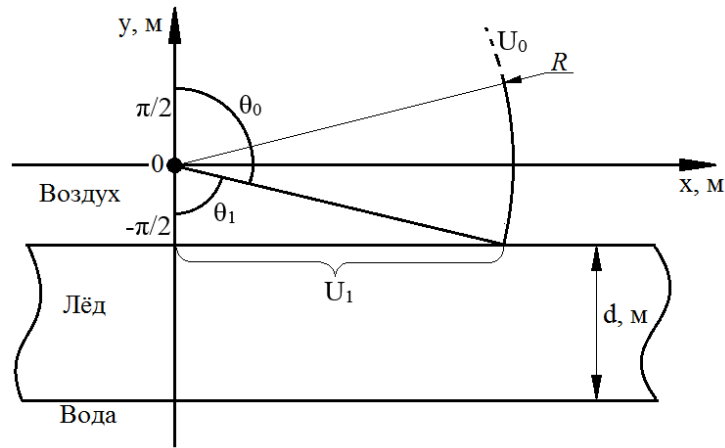


Рисунок 2. Поле точечного источника вблизи слоя льда.

0 – источник излучения, **U1** – граница раздела «воздух -лед».

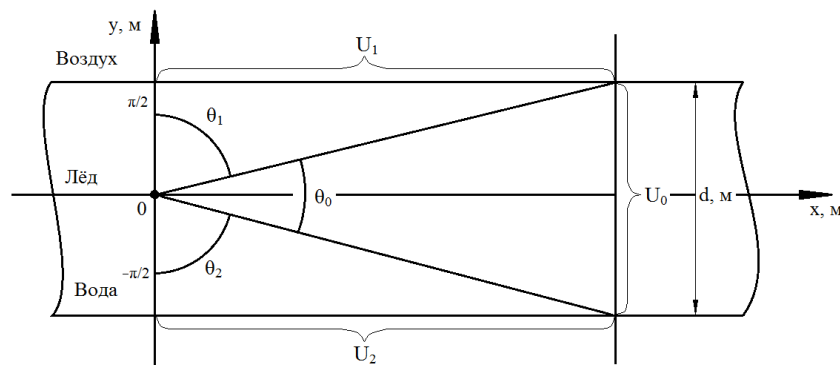


Рисунок 3. Поле точечного источника внутри слоя льда.

0 – источник излучения, **U1** – граница раздела «лед - воздух»,

U2 – граница раздела «лед - вода», **U0** – граница, показывающая предел расчета.

Две сопряженные функции Грина являются решением уравнения Гельмгольца. Одна из функций Грина описывает расходящиеся от поверхности излучателя волны $G_l(M, M_0)$, а сопряженная с ней функция $G_l^{-1}(M, M_0)$ – отраженные [1, 3].

$$G_{\Sigma} = \sum_{l=1}^L \left[G_l(M, M_0) + k_{\text{отпл}} G_l^{-1}(M, M_0) \right] \quad (1)$$

M - точка приема сигнала с координатами x и y ;

M_0 – точка излучения сигнала с координатами x_0 и y_0 ;

Направленная функция Грина имеет вид:

$$G_l = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{U_{l \min}}^{U_{l \max}} \frac{F_l(\theta)}{\sqrt{k^2 - U_l^2}} \cdot e^{[i \cdot (x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U_l^2} + (y(x)-y_0) \cdot U_l]} dU_l \quad (2)$$

где $F_l(\theta) = 1$, если $\theta_{l \min} \leq \theta \leq \theta_{l \max}$ при $l=1,2,3,\dots,l$. $F_l = 0$ при остальных значениях θ .

В данной работе сферические волны представлены в виде суперпозиции плоских волн, поэтому справедливо использование коэффициента отражения для плоских волн от плоского слоя (3) и от границы раздела сред(4):

$$k_{\text{ompl}} = \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_2 - Z_3) \cdot e^{-ik_{2z}d} + (Z_1 - Z_3) \cdot (Z_2 + Z_3) \cdot e^{ik_{2z}d}}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_2 + Z_3) \cdot e^{-ik_{2z}d} + (Z_1 - Z_3) \cdot (Z_2 - Z_3) \cdot e^{ik_{2z}d}} \quad (3)$$

$$k_{\text{ompl}} = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (4)$$

d – толщина слоя льда;

k_{2z} – компонента волнового вектора;

Z_1 – волновое сопротивление 1 - й среды, равное:

$$Z_l = \frac{\sqrt{\epsilon_l}}{\mu_l} / \cos \theta_l \quad (5)$$

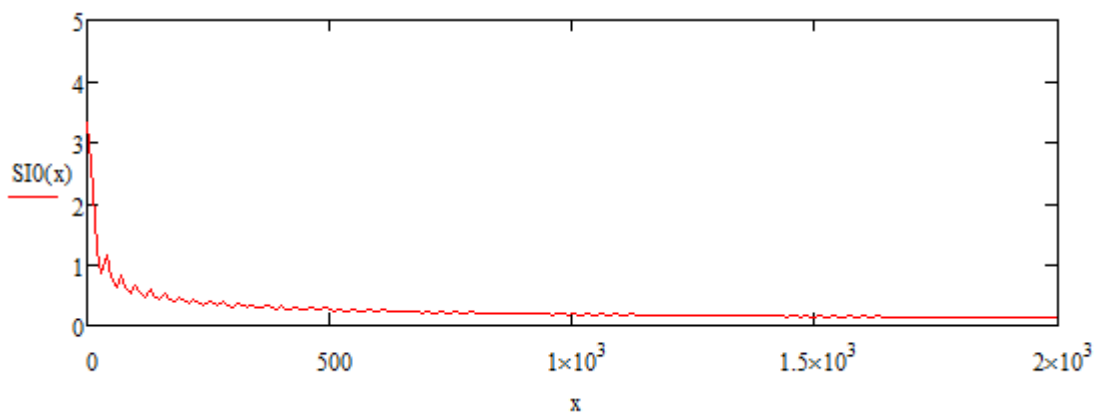
Направленная функция Грина для падающей и отраженной волн запишутся как:

$$G_l = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{U_{l \min}}^{U_{l \max}} \frac{F_l(\theta)}{\sqrt{k^2 - U_l^2}} \cdot e^{[i \cdot (x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U_l^2} + (y(x)-y_0) \cdot U_l]} dU_l + \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot k_{\text{ompl}} \cdot \int_{U_{l \min}}^{U_{l \max}} \frac{F_l(\theta)}{\sqrt{k^2 - U_l^2}} \cdot e^{[-i \cdot (x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U_l^2} + (y(x)-y_0) \cdot U_l]} dU_l \quad (6)$$

Выражение (6) распределение амплитуды падающих и отраженных волн вблизи слоя льда или границы раздела.

Результаты численных расчетов: на рисунках 4-10 приведены результаты расчетов по предложенной модели при расположении источника в слое льда. Исходные данные: частота источника $f=10$ МГц; толщина слоя льда $d=1$ м, расчетное расстояние 2000 м, мощность излучателя $P=35$ Вт, относительная диэлектрическая проницаемость воздуха=1; льда=3,25; воды=81.

Рисунок 4. График распределения напряженности электрического



поля в свободном воздушном пространстве.

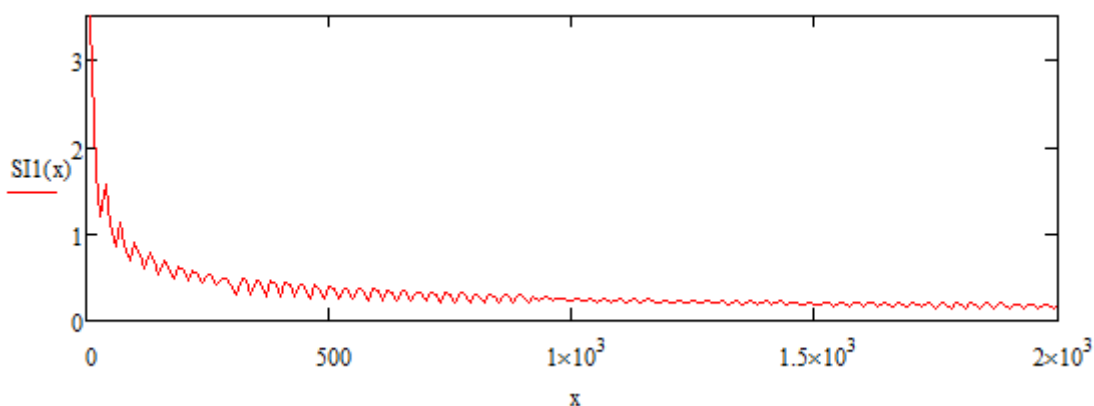


Рисунок 5. График распределения напряженности электрического поля вблизи слоя льда (источник располагается на границе раздела «воздух-лед»).

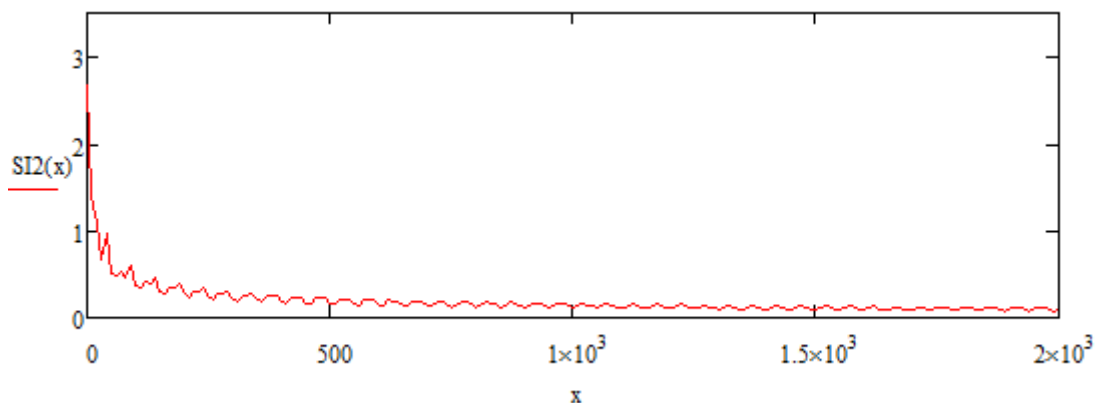


Рисунок 6. График распределения напряженности электрического поля внутри слоя льда.

Заключение: графики показывают, что напряженность электрического поля наибольшая при расположении источника вблизи слоя льда, что объясняется малым волновым сопротивлением воздуха и явлением интерференции прямой и отраженной волн от слоя льда.

Напряженность поля источника в слое льда больше чем в воздухе за счет интерференции прямой и отраженных от границ раздела «лед-воздух», «лед-вода» волн.

Полученные данные будут полезны для изучения физических свойств различных сред и материалов, прогноза дальности связи в заданных условиях.

Список литературы:

1. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. Владивосток: Дальнаука, 1998. 192 с.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 340 с.
3. Шевкун С.А. Разработка методов анализа волновых полей в замкнутых объемах: дис., канд. физ.-мат. наук. Владивосток, 2006. 186 с.
4. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Ленинград: Судостроение, 1972. 348 с.
5. Короченцев В.И., Корчака А.В., Эм А.А., Математическая модель излучателя сферических волн в слоистой среде. Владивосток: Вестник инженерной школы ДВФУ, 2019. 5с.