

6. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory / J. J. More // In: Watson, G.A. (eds) Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics. – 1978. – Vol. 630. – P. 105-116. – DOI 10.1007/BFb0067700.

УДК 004.942, 519.6, 537.874

Твёрдый Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории «электромагнитного излучения», Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Tverdyi Dmitriy Alexandrovich, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Researcher of Laboratory “Electromagnetic radiation”, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS

Малкин Евгений Ильич, научный сотрудник лаборатории «электромагнитного излучения», Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Malkin Evgeniy Illich, Associate Researcher of Laboratory “Electromagnetic radiation”, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОНЧ РАДИОВОЛН В ЕСТЕСТВЕННОМ ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА И ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ГРАНИЦ

ABOUT ONE PROBLEM OF COMPUTER MODELING OF VLF RADIO WAVE PROPAGATION IN A NATURAL EARTH-IONOSPHERE WAVEGUIDE AND BACKSCATTERING FROM BOUNDARY INHOMOGENEITIES

Аннотация. Среди различных явлений атмосферного электричества интерес представляют грозовые разряды, так как они могут сопровождать или вызывать катастрофические явления. Грозовые разряды порождают радиоволны с максимумом интенсивности в очень низкочастотном диапазоне. Радиоволны распространяются в волноводе, образованном поверхностью Земли и нижней границей ионосферы. Границы волновода могут иметь участки неоднородной проводимости, на которых будет происходить рассеяние этих радиоволн. В работе предлагается упрощенная математическая модель в первом приближении для описания возмущений радиоволн в полосковом волноводе над очагом подготовки землетрясения. В результате моделирования показано, что в участках неоднородной проводимости границ волновода происходит обратное рассеяние, а в

зависимости от типа неоднородности меняются характеристики проходящей радиоволны.

Abstract. Among the various phenomena of atmospheric electricity, thunderstorms are of interest, since they can accompany or cause catastrophic phenomena. Lightning discharges generate radio waves with a maximum intensity in a very low frequency range. Radio waves propagate in a waveguide formed by the Earth's surface and the lower boundary of the ionosphere. The boundaries of the waveguide may have areas of inhomogeneous conductivity on which these radio waves will be scattered. The paper proposes a simplified mathematical model in the first approximation to describe the disturbances of radio waves in a strip waveguide above the earthquake preparation site. As a result of the simulation, it is shown that in the areas of inhomogeneous conductivity of the waveguide boundaries, backscattering of the radio wave occurs, and depending on the type of inhomogeneity, the characteristics of the passing radio wave change.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, ОНЧ, математическое моделирование, уравнения Максвелла, FDTD, волновод Земля-ионосфера, PML, PEC, неоднородная проводимость, обратное рассеяние, MATLAB.

Keywords: electromagnetic radiation, VLF, mathematical modeling, Maxwell's equations, FDTD, Earth-ionosphere waveguide, PML, PEC, inhomogeneous conductivity, backscattering, MATLAB.

Введение

Среди различных явлений атмосферного электричества интерес представляют грозовые разряды, так как они могут сопровождать или вызывать катастрофические явления. Согласно данным сети радиодатчиков молний The World Wide Lightning Location Network (WWLLN), на Земле каждую секунду происходит до 50 разрядов молний. В большинстве наземных наблюдений в очень низкочастотном (ОНЧ) диапазоне преобладают «сферики» («атмосферики») — импульсные широкополосные радиосигналы грозовых разрядов. Грозовые очаги можно представлять как постоянно действующие источники импульсного электромагнитного (ЭМ) излучения, при этом основная часть энергии этого излучения находится в ОНЧ-диапазоне (3–30 кГц). Радиоволны распространяются не в свободном пространстве, а в волноводе «Земля-ионосфера» сложной структуре, направляющей волны в одном направлении, образованный поверхностью Земли и нижней границей ионизированной части атмосферы [1]. Границы (стенки) волновода могут иметь участки неоднородной проводимости, на которых будет происходить рассеяние. Зачастую в исследованиях рассматриваются ионосферные неоднородности. В то же время существуют участки неоднородной проводимости нижней границы, обусловленные изменением электрофизических свойств Земли [2]. Такие участки будут неизбежно влиять на характеристики ЭМ волн. Поэтому, исследуя параметры ОНЧ сфериков, можно определить наличие участка неоднородной проводимости нижней границы волновода.

Идея о том, что граничные условия на земной поверхности могут влиять на распространение радиоволн и давать предвестниковый эффект, появилась ещё во второй половине прошлого века. Тогда учёные начали наблюдать за изменениями амплитуды и фазы сигналов радиостанций, радиотрассы которых пролегают над очагами подготовки землетрясений. Основная сложность поиска предвестниковых эффектов в данных радионаблюдений — это отсутствие комплексной модели возмущений в волноводе Земля-Ионосфера при подготовке землетрясений.

Целью данного исследования является построение модели распространения ОНЧ-радиоволны от точечного источника, приближённо описывающей грозовой разряд, и возмущений ЭМ поля, возникших при её взаимодействии с участками неоднородной проводимости волновода, которые могут быть связаны с очагами подготовки землетрясения.

Упрощенная модель волновода

ОНЧ-радиоволны являются возмущениями ЭМ поля волнового характера с определённой частотой. Поле характеризуется электрическими \vec{E} и магнитными \vec{H} напряженностями среды и описывается системой основных уравнений электромагнетизма [3] на основе уравнений Максвелла [4].

Схематично, волновод «Земля-ионосфера» можно представлять образованным объёмом нейтральной атмосферы и двумя проводящими объёмами, искривлёнными относительно радиуса Земли. Основное упрощение данной модели в том, что рассматривается плоский волновод, пренебрегая кривизной Земли. После чего рассматривается его двумерное сечение в Декартовой системе координат, ортогональное Земле, которое можно рассматривать как полосковый волновод). Система уравнений для ЭМ поля для полоскового волновода представляется двумя независимыми системами уравнений, из которых рассматривается TE_y — поперечно-электрическая к оси y мода.

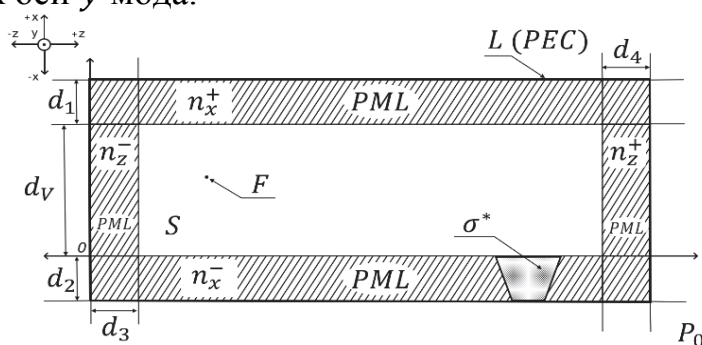


Рисунок 1 – Схематичное представление модели как полоскового волновода: где, F - источник энергии ЭМ поля; σ^* - участок неоднородной проводимости среды

Граничные условия задаются такими, чтобы контур, ограничивающий полосковый волновод, являлся экранирующей границей [3] — идеальный проводник (PEC) [4], контур, полностью отражающий падающие ЭМ волны. Для моделирования стенок волновода с плавно изменяющимися

параметрами среды (skin-слой), воспользуемся дополнительными граничными условиями, а именно Perfect Matched Layer (PML) [5] — специальные области вдоль PEC, где проводимости меняются по степенному закону. Таким образом, EM поле локализуется в области, моделирующей атмосферу, а PML среды поглощают проходящие через них волны. Участок неоднородной проводимости Земли моделируется участком PML нижней границы волновода определённой геометрии, где проводимость определяется другими параметрами. Далее модельные уравнения решаются численно по схеме FDTD на равномерной сетке [6]. Все расчёты и визуализации реализуются в виде программного комплекса в пакете MATLAB.

Заключение

Представлена упрощенная математическая модель в первом приближении для описания возмущений радиоволн в полосковом волноводе над очагом подготовки землетрясения. В ходе компьютерных численных экспериментов на основе предложенной модели симулируется распространение радиоволны с частотой 10 [кГц] вдоль участков неоднородной проводимости различной геометрии. В результате показано, что в участках неоднородной проводимости границ полоскового волновода происходит обратное рассеяние радиоволны. Показано, что в зависимости от типа неоднородности меняются характеристики проходящей радиоволны.

Дальнейшее продолжение работы состоит в уточнении модели. Например, перейти к постановке трехмерной задачи или рассматривать волновод «Земля-ионосфера» естественной, искривленной формы. Это позволит в будущем сопоставлять результаты моделирования обратного рассеяния по уточненной модели с реальными данными.

Благодарности

Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Альперт, Я. Л. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля – ионосфера / Я. Л. Альперт, Э. Г. Гусева, Д. С. Флигель. – Москва: Наука, 1967. – 123 с.
2. Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений / Г. Н. Копылова, Н. В. Гусева, Ю. Г. Копылова, С. В. Болдина // Вулканология и Сейсмология. – 2018. – Т. 12. – № 4. – С. 43-62. – DOI: 10.1134/S0203030618040041. – EDN XWLMMDR.
3. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – Москва: Наука, 1973. – 607 с.
4. Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method, 3rd edition / A. Taflove, S. C. Hagness. – Massachusetts: Artech House, 2005. – 1038 pp. – ISBN 9781580538329.

5. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves / J. P. Berenger // Journal of Computational Physics. – 1994. – Vol. 114. – No 2. – P. 185-200. – DOI 10.1006/jcph.1994.1159

6. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media / K. Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14. – No 3. – P. 302-307. – DOI 10.1109/TAP.1966.1138693.

УДК 538.91

Терновой Никита Константинович, студент, Дальневосточный
Федеральный Университет

Ternovoi Nikita Konstantinovich, student, Far Eastern Federal University

Нефедев Константин Валентинович Институт прикладной математики
ДВО РАН

Nefedev Konstantin Valentinovich, Institute of Applied Mathematics, Far
Eastern brunch of RAS

Анисич Александр Игоревич, студент, Дальневосточный федеральный
университет

Anisich Alexandr Igorevich, student, Far Eastern Federal University

Лобанова Элиза Александровна, студент, Дальневосточный федеральный
университет, лаборант, Институт прикладной математики ДВО РАН

Lobanova Eliza Alexandrovna, student, Far Eastern Federal University,
laboratory assistant, Institute of Applied Mathematics, Far Eastern brunch of RAS

Черкасов Михаил Дмитриевич, студент, Дальневосточный федеральный
университет

Cherkasov Michail Dmitrievich, student, Far Eastern Federal University

Прохоров Егор Игоревич Дальневосточный федеральный университет

Prokhorov Egor Igorevich Far Eastern Federal University

ПОИСК ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ РЕШЕТКИ ХОПФИЛДА

SEARCH FOR THE LOW-ENERGY STATE OF THE HOPFIELD LATTICE

Аннотация. Спиновые стекла определяются как неупорядоченные системы со случайными конкурирующими взаимодействиями [1]. Спиновая решетка при изменении взаимодействия между спинами меняет энергетическое состояние. Цель- Найти низкоэнергетическое состояние системы изменяя направление спинов, на примере решетки из статьи [2], в которой реализовано искусственное спиновое стекло, которое повторяет аспекты нейронной сети Хопфилда [3]. Получен алгоритм вычисления одного из низкоэнергетических состояний, а также визуализация этого состояния на примере данных [2].