УДК 621.396.96

Выявление и различение границ объемно-распределенных неоднородностей в подповерхностном слое земли методом трехмерного электродинамического моделирования

В. Н. Муравьев, В. Е. Туров, А. Н. Кренев, Е. М. Ильин, А. И. Полубехин

Представлены результаты численного трехмерного электродинамического моделирования, показывающие возможность обнаружения и различения границ неоднородностей при помощи подповерхностного зондирования радиолокационной станцией X-диапазона с возможностью управления поляризацией излучаемого сигнала. Исследована зависимость затухания отраженного сигнала от плотности лесного покрова и установлена возможность определения границ неоднородностей.

Ключевые слова: методы численного моделирования, подповерхностное зондирование, эхо-сигналы, плоскослоистая структура.

1. Введение

Решаемая задача численного моделирования – анализ эхо-сигналов от объемно-распределенных неоднородностей с различными диэлектрическими характеристиками, расположенных в среде, на предмет возможности обнаружения и различения их границ [1].

Метод конечного интегрирования, или метод конечных элементов FEM, рассматривает уравнения Максвелла не в дифференциальной, а в интегральной форме. Для численного решения этих уравнений определяется область расчета, которая разбивается на ячейки. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла проводится на двух ортогональных сетках, на которых также вводится новая степень свободы в виде значения интеграла. Напряженность электрического поля *e* и магнитные потоки *b* рассматриваются на первичной сетке, а поляризация *d* и магнитное поле *h* – на вторичной сетке [2, 3].

2. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла

Для расчета пространственных распределений поля используется метод конечных интегралов, реализованный в программном продукте CST Microwave Studio. Метод конечных интегралов имеет высокую эффективность в задачах, в которых необходим анализ нестационарных процессов в неоднородном, анизотропном пространстве для объектов с произвольной формой границ [4].

Уравнения Максвелла в интегральной форме имеют вид:

$$\oint_l \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}\,,\quad \oint_l \vec{H}\cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}\right) d\vec{s}\;; \qquad (1)$$

$$\oiint_S \vec{D}\cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho dV\,,\quad \oiint_S \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0\,.$$

Для численного решения этих уравнений определяется область расчета. В процессе создания сетки эта область разбивается на ячейки. Такую сетку, называемую первичной, можно увидеть в программе Microwave Studio. Есть еще и вторичная, или двойная, сетка, которая строится ортогонально первичной. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла проводится на этих двух ортогональных сетках. После пространственной дискретизации на сетках уравнения Максвелла отдельно записываются для каждой грани ячейки. Правило расчета для всех граней ячейки может быть представлено в матричном виде с топологической матрицей *C*, которая является дискретным эквивалентом аналитического оператора ротора. На рис. 1 показана процедура дискретизации первого из уравнений (1):

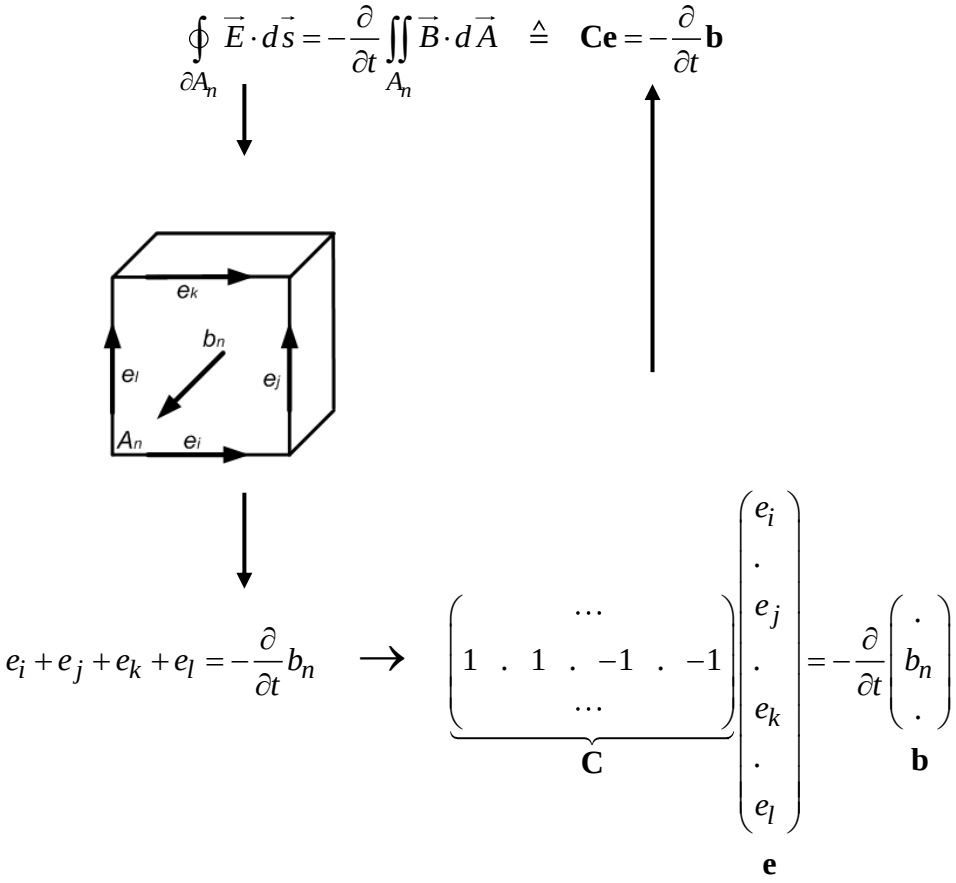

Рис. 1. Процедура дискретизации уравнений Максвелла

Применив описанную схему к правилу Ампера на вторичной сетке, получим соответствующий дискретный оператор циркуляции $\tilde{C}$. Похожим образом дискретизация оставшихся уравнений дивергенции дает соответствующие потоку дискретные операторы $\tilde{S}$ и S, принадлежащие первичной и вторичной сетке соответственно. Эти дискретные матричные операторы состоят только из элементов *0, 1* и *-1* и представляют исключительно топологическую информацию. Окончательно имеем полностью дискретизированный набор так называемых сеточных уравнений Максвелла:

$$\mathbf{Ce} = -\frac{\partial}{dt}\mathbf{b},\ \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{\partial}{dt}\mathbf{d} + \mathbf{j}; \tag{2}$$

$$\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q},\ \mathbf{Sb} = 0.$$

3. Трехмерное электродинамическое моделирование

Модель рассматриваемой плоскослоистой структуры, построенная в CST MWS, состоит из слоя с заданными значениями толщины и диэлектрической проницаемости и расположенного в нем распределенного объекта, обладающего отличными от остальной структуры диэлектрическими свойствами. Для определения возможности выявления и различения границ неоднородностей по виду пространственной структуры электромагнитного поля были проведены исследования для нескольких вариантов расположения объемно-распределенных неоднородностей.

Базовый объект представлен в виде прямоугольной неоднородности с размерами 1.5 м × 0.5 м × 0.5 м. Глубина закладки – 0.5 м. Грунт – сухой песок (ε = 2.53), материал стенок – дерево (рис. 2). Вариант реализации поверхности грунта – искривленная (реальная) поверхность с характеристиками, приближенными к практически изотропному отражению (рис. 2).

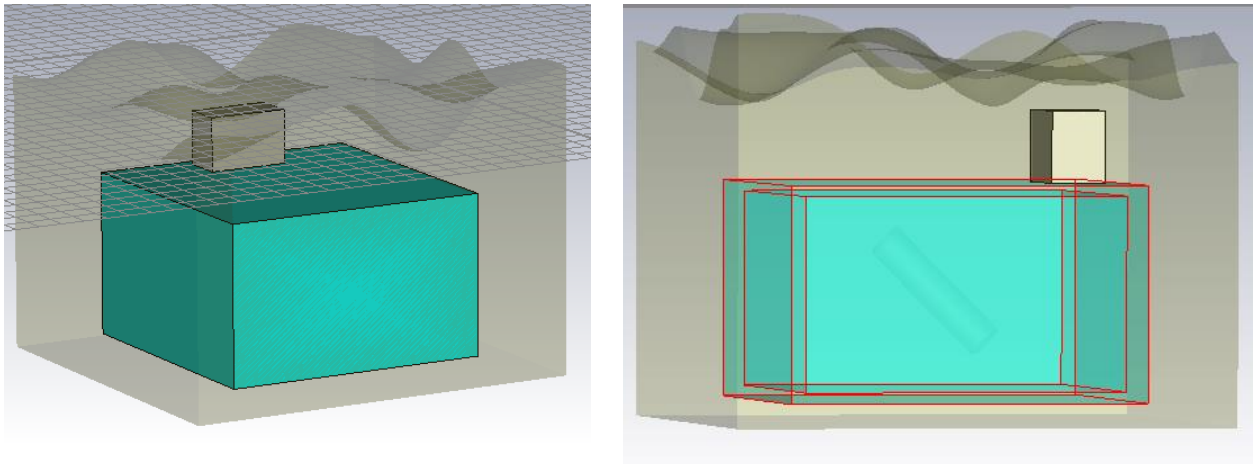

Рис. 2. Трехмерная модель расположения объемно-распределенной неоднородности в грунте

Поляризация излучения и приема – вертикальная. Зондирующий сигнал представлял собой прямоугольный импульс длительностью 3.3 нс на несущей частоте 9.8 ГГц. Высота установки антенн – 6.59 м (рис. 3). Прием сигнала осуществляется в точке, находящейся в плоскости антенны и отстоящей от центра на 12 см. Принимаемый радиосигнал представлял собой суперпозицию прямого сигнала и отраженных сигналов от неоднородных по диэлектрической проницаемости структур, вторичных отражений и шума.

Рис. 3. Схема проведения эксперимента

Эксперимент 1. Моделировалось несколько вариантов расположения неоднородностей, а также внутреннего содержания. На рис. 4а показан исследуемый объем однородного грунта без базового объекта. На рис. 4б представлена модель принятого эхо-сигнала.

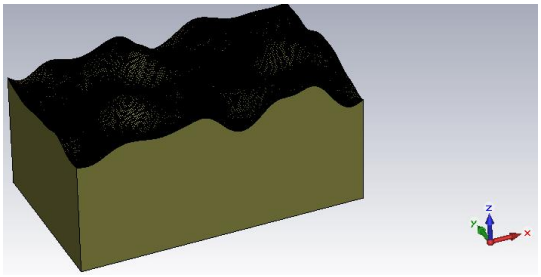

Рис. 4а. Грунт без неоднородности

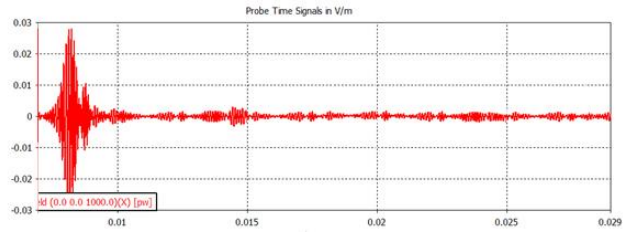

Рис. 4б. Модель принятого сигнала

В осциллограмме эхо-сигнала от структуры без неоднородности (рис. 4б) присутствует хорошо заметный сигнал, отраженный от границы воздух (ε = 1) – грунт (ε = 2.53) на дальности, соответствующей расстоянию от антенны, моделируемой РЛС до земли.

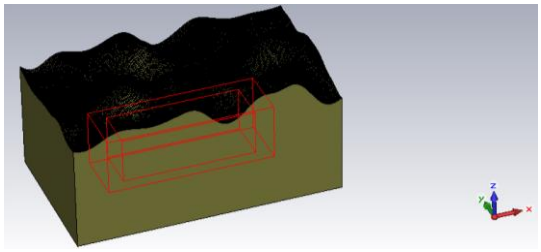

Рис. 5а. Положение неоднородности на глубине 0.5 м

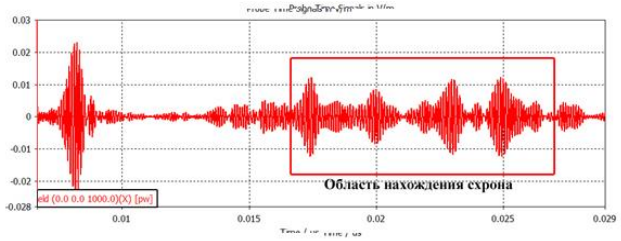

Рис. 5б. Модель принятого сигнала

Для случая нахождения неоднородности в виде базового объекта на глубине 0.5 м (рис. 5а) рассчитана ожидаемая область нахождения откликов в принятом эхо-сигнале (выделено прямоугольником на рис. 5б). В модели принятого сигнала в ожидаемой области наблюдаются характерные отражения, соответствующие верхней и нижней границе разделов грунт-неоднородность-грунт. По результатам приема и с учетом диэлектрических параметров оценен линейный размер объекта по вертикали, который составил 0.52 м. Ошибка измерения линейного размера – в пределах 4 %.

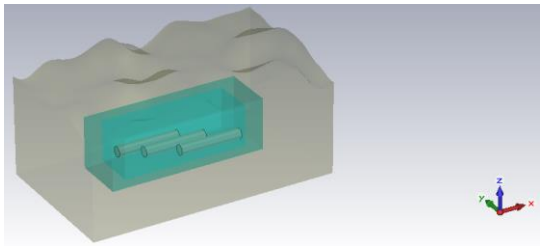

Рис. 6а. Положение неоднородности с тремя металлическими цилиндрами радиусом 5 см и длиной 60 см

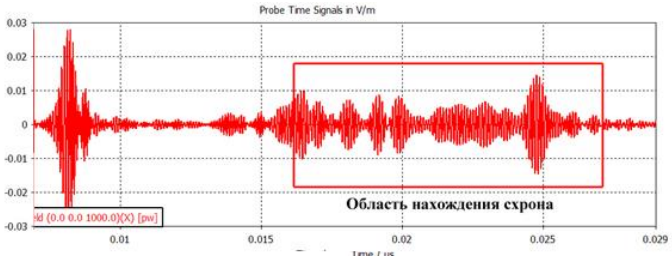

Рис. 6б. Модель принятого сигнала

В случае добавления внутрь базового объекта металлических цилиндров радиуса 0.05 м и длиной 0.6 м (рис. 6а) осциллограмма (рис. 6б) претерпевает изменения за счет дополнительных переотражений, сохраняя при этом возможность различения границ.

Эксперимент 2. Моделирование проводилось для нескольких вариантов плотности поверхностного (лесного) покрова (см. схему на рис. 7). Слой растительности смоделирован диэлектрическими цилиндрическими элементами радиусом a, высотой h с диэлектрической проницаемостью, соответствующей экспериментальным данным, полученным из исследова-

ний свойств влажной древесины при высокой, средней и низкой плотности лесного покрова (рис. 9а, 10а, 11а). Предложенная модель лесной среды построена из композитных цилиндрических элементов на подстилающей земной поверхности. Внутренние цилиндры соответствуют стволам деревьев, внешняя оболочка – кроне. Диэлектрическая проницаемость композитных элементов среды определяется как результирующая. На основе данной модели проведены расчеты зависимости ослабления поля от плотности лесного покрова (рис. 9б, 10б, 11б).

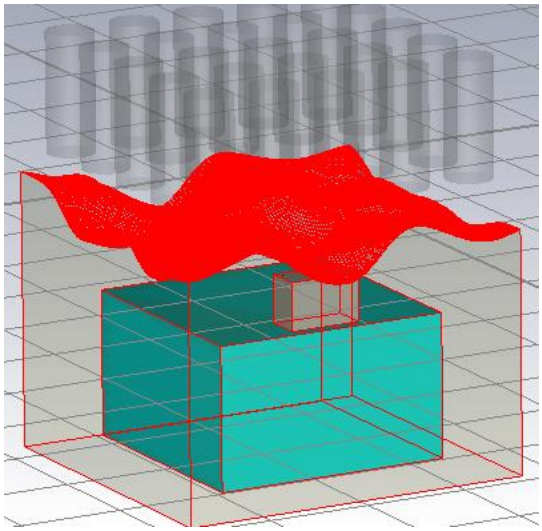

Рис. 7. Трехмерная модель поверхностного покрова и неоднородности в грунте

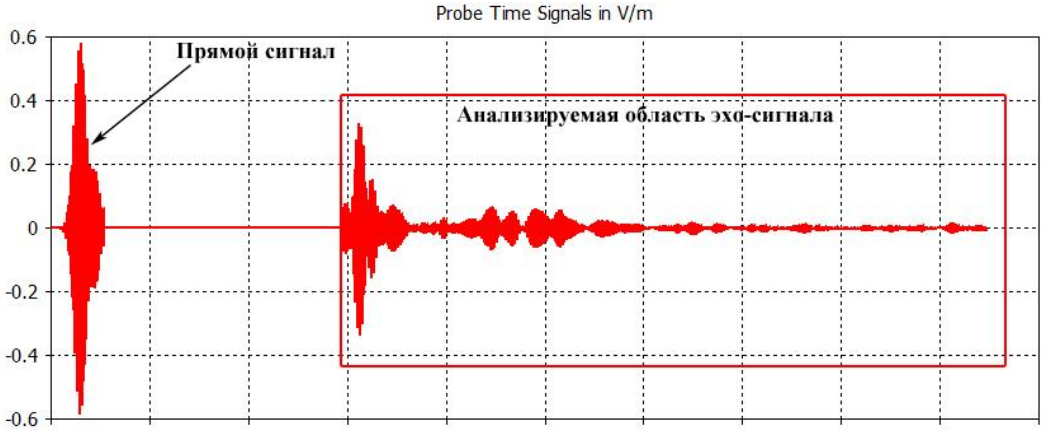

Рис. 8. Модель принятого сигнала

Задача различения границ раздела значительно усложняется в связи с падением уровня принятого сигнала в анализируемой области из-за наличия затеняющих объектов (рис. 8).

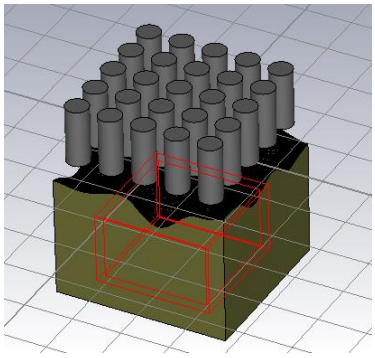

Рис. 9а. Базовый объект под поверхностью с лесным покровом высокой плотности

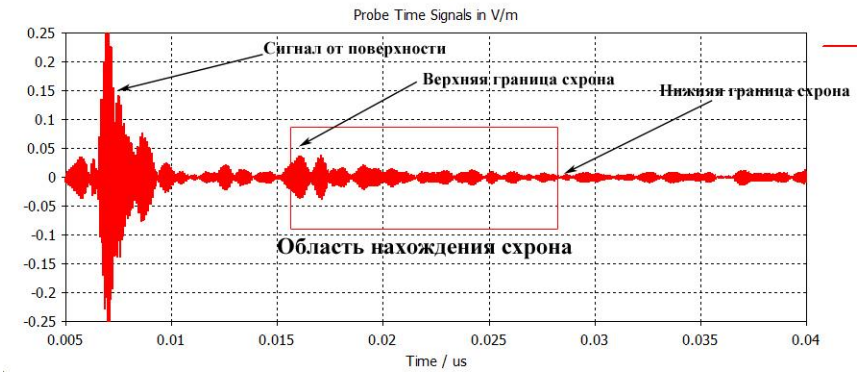

Рис. 9б. Положение откликов от границ схрона в модели принятого сигнала при высокой плотности лесного покрова

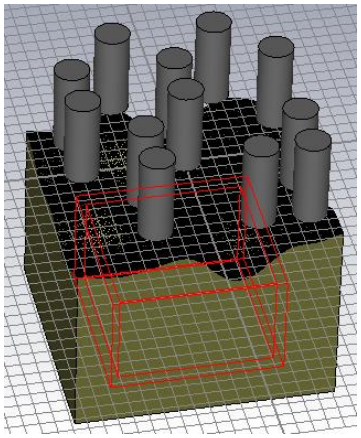

Рис. 10а. Базовый объект под поверхностью с лесным покровом средней плотности

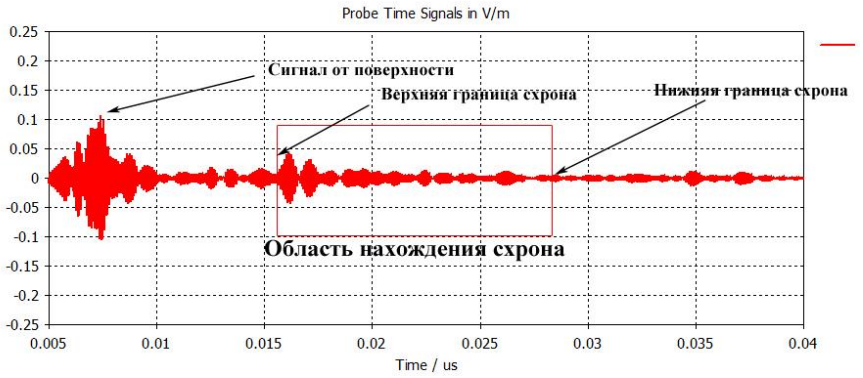

Рис. 10б. Положение откликов от границ схрона в модели принятого сигнала при средней плотности лесного покрова

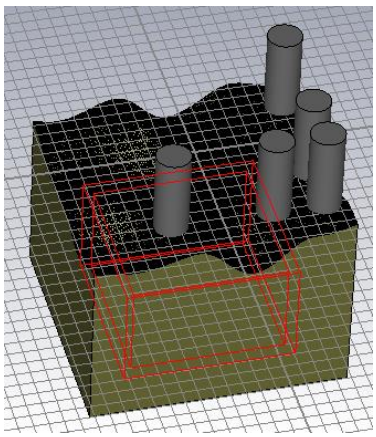

Рис. 11а. Базовый объект под поверхностью с лесным покровом низкой плотности

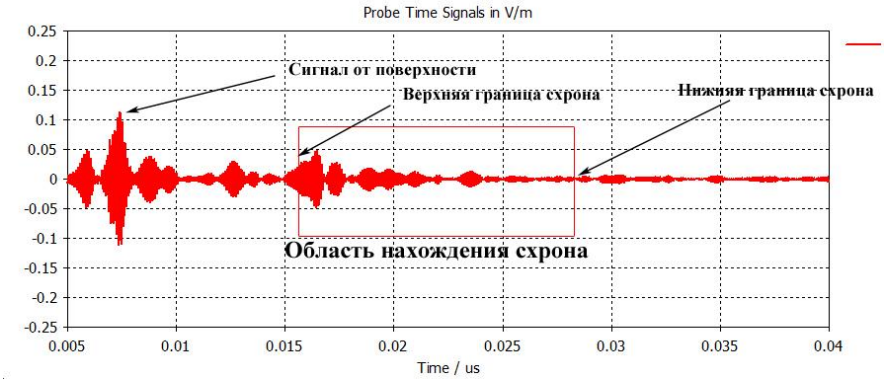

Рис. 11б. Положение откликов от границ схрона в модели принятого сигнала при низкой плотности лесного покрова

Анализ полученных результатов показывает зависимость амплитуды и структуры эхо-сигналов от плотности лесного покрова. Чем плотнее покров, тем больше амплитуда эхо-сигнала от поверхности и тем больше он сосредоточен по задержке. При этом амплитуда и структура эхо-сигнала от верхней границы схрона почти не меняется. Нижняя граница схрона во всех вариантах плотности лесного покрова наблюдается с трудом, в отличие от эксперимента, где лесной покров отсутствовал. Это вызвано значительным дополнительным ослаблением эхо-сигнала от нижней границы схрона лесным покровом.

4. Заключение

В ходе выполнения работы проведена замена реальной среды и аппаратной части на их модели с аналогичными параметрами и получены результаты с применением методов численного моделирования (FEM-метод). Моделирование предполагало получение эхо-сигналов на модели плоскослоистой структуры с заданными диэлектрическими параметрами. На этом этапе использовалась система трехмерного электродинамического моделирования CST MWS. Результаты моделирования показали возможность нахождения пространственно-распределенных неоднородностей и различения границ раздела сред для условий отсутствия лесного покрова в заданных условиях модельного эксперимента. Наличие лесного покрова

различной интенсивности затрудняет нахождение границ (особенно нижних) пространственно-распределенных неоднородностей.

Литература

1. *Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А.* Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Советское Радио, 1966. 167 с.
2. *Paul C R.* Electromagnetic Compatibility. Wiley, 2006. 1013 p.
3. *Milligan T. A.* Modern Antenna Design. Wiley, 2005. 663 p.
4. *Банков С. Е., Курушин А. А.* Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М.: Родник, 2008. 276 с.

Статья поступила в редакцию 21.05.2016

Туров Виктор Евгеньевич
д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150050, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 78-85-11, e-mail: victorturov@gmail.com.

Полубехин Александр Иванович
к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), тел. 89258210631, e-mail: polub1980@mail.ru.

Ильин Евгений Михайлович
д.ф.-м.н, профессор, ведущий аналитик МГТУ им. Н. Э. Баумана (105077, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 17), тел. (499) 263-6846, e-mail: evgil45@mail.ru.

Кренев Александр Николаевич
к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150023, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 78-85-11, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru.

Муравьев Виктор Николаевич
инженер первой категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150023, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 78-85-11, e-mail: myrvn@rambler.ru.

Identification and distinction of the volume distributed non-uniformity limits in a subsurface layer of the earth by the method of three-dimensional electrodynamic simulation

Viktor N. Muravev, Viktor E. Turov, Alexander N. Krenev, Evgeny M. Ilyin, Alexander I. Polubekhin

The results of numerical three-dimensional electrodynamic simulation demonstrating the possibility of detection and distinction of non-uniformity limits by means of X-range radar station subsurface sensing with the possibility of raiated signal polarization control are presented. Attenuation dependence of the reflected signal on forest cover density is investigated and the possibility of non- uniformity delimitation is identified.

Keywords: numerical simulation methods, subsurface sensing, echo signals, plane structure.