

тивление ниже целевого значения в диапазоне частот от 1 до 89,9 МГц. Эта сборка состоит из конденсаторов с номинальным значением 100, 680 и 1000 нФ. При этом выявлено, что необходимо вводить дополнительные конденсаторы без резкого перепада емкости между ними. Это необходимо для исключения появления антирезонансов, которые отрицательно влияют на целостность питания.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кечиев Л.Н. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. – М.: Грифон, 2016. – 400 с.

2. Kim J. Separated Role of On-chip and On-PCB Decoupling Capacitors for Reduction of Radiated Emission on Printed Circuit Boards / J. Kim, B. Choi, H. Kim, W. Ryu, Y. Yun, S. Nam, S. Kim, Y. Lee, J. Kim // Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2001. – P. 531–536.

3. Goral B. Power Delivery Network Simulation Methodology Including Integrated Circuit Behavior / B. Goral, C. Gautier, A. Amedeo // 2016 IEEE 20th Workshop on Signal and Power Integrity (SPI). – May 2016.

УДК 621.372, 537.874

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАТНЫХ ВОЛН ГЕОРАДАРА, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ОБЪЕКТОВ В ВЕРХНЕМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

М.А. Иноземцев, аспирант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, ma87@sibmail.com

Представлены результаты численного моделирования обратных волн, возникающих при отражении зондирующих сигналов георадара при его работе в условиях горной выработки от границ раздела сред в верхнем полупространстве, а также от проводящих объектов, расположенных в верхнем полупространстве. Описаны параметры модели, приведены полученные в результате моделирования отдельные трассы и радарограммы.

Ключевые слова: георадар, численное моделирование, метод FDTD, отраженный сигнал.

В настоящее время георадары применяются при решении ряда инженерных, научных и других задач. Одной из сфер их применения является контроль состояния состояния кровли и приконтурных массивов горных выработок шахт, рудников. Ограниченные размеры выработки, наличие в ней крупногабаритного оборудования или других объектов

затрудняют проведение таких работ. Кроме того, несмотря на использование экранированных антенн, полностью подавить излучение в верхнее полупространство не удастся, что приводит к появлению отраженных волн от объектов, расположенных в нем. Таким образом, интерпретация радарограммы может оказаться затрудненной.

Цель работы – выполнить численное моделирование обратных волн георадара, отраженных от объектов в верхнем полупространстве.

Для оценки влияния объектов, расположенных в верхнем полупространстве, на результаты георадиолокационного исследования разработана модель горной выработки и проведено численное моделирование методом конечных разностей во временной области (КРВО, англ. FDTD – Finite Difference Time Domain) в программном обеспечении grMax [1]. Горная выработка в модели представлена в виде набора слоев (рис. 1). Слои 1, 3 и 4 с характеристиками $\epsilon_1 = 7$, $\sigma_1 = 0,0003$ См/м, $\epsilon_3 = 7$, $\sigma_3 = 0,0003$ См/м, $\epsilon_4 = 4$, $\sigma_4 = 0,0005$ См/м соответствуют слоям горных пород выработки. Их электрические характеристики заданы в соответствии с [2]. Так как рассматриваемые горные породы немагнитные, то $\mu_1 = \mu_3 = \mu_4 = 1$. Слои 2 – свободное пространство ($\epsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$). Толщины слоев соответственно равны 0,75; 1,1; 0,75; 1,25 м. Приемная и излучающая антенны георадара заданы в виде элементарных электрических излучателей, расположенных на границе раздела слоев 2 и 3. Расстояние между антеннами выбрано равным 0,2 м. На излучающую антенну подается импульс Гаусса с центральной частотой 400 МГц и амплитудой 10 В. Верхнее полупространство модели относительно антенн представлено слоями 1 и 2. Моделирование проводится в двумерном режиме, поэтому размер модели вдоль оси Z равен размеру одной ячейки сетки. Размеры модели по осям X и Y соответственно равны 5,5 и 3,85 м.

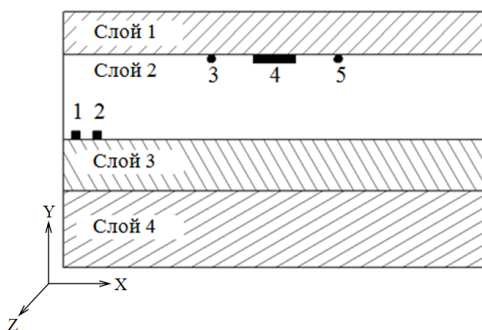


Рис. 1. Модель горной выработки: 1, 2 – излучающая и приемная антенны; 3, 5 – металлические цилиндры; 4 – металлический объект прямоугольной формы

Шаг сетки FDTD определен исходя из наименьшей длины волны в слоях модели и равен 25 мм по осям X , Y и Z . Для исключения отражения волн от границ рассматриваемого объема были заданы поглощающие условия в виде сетки PML [3]. Для того чтобы оценить влияние проводящих объектов, расположенных в верхнем полупространстве, было создано два варианта модели. В первом варианте в верхнем полупространстве нет проводящих объектов, и при распространении в нем зондирующего импульса отражение возникает на границе раздела слоев 1 и 2. Во втором варианте в слое 2 размещены два цилиндрических объекта и один объект прямоугольной формы (см. рис. 1), которые в реальных условиях могут представлять собой трассы коммуникаций, оборудование, размещенное в металлических корпусах, или другие подобные объекты. В этом случае в принятом сигнале дополнительно будут присутствовать отражения от данных объектов. Сравнение результатов, полученных при моделировании двух вариантов, позволит сделать вывод о влиянии проводящих объектов, расположенных в верхнем полупространстве, на вид радарограммы.

Программное обеспечение grgMax позволяет моделировать как отдельные трассы (А-скан) при определенном пользователем положении антенн в модели, так и набор трасс (радарограммы, В-сканы) в том случае, если заданы начальное положение антенн и величина их перемещения вдоль оси X , которая в данной работе составляет 25 мм. На рис. 2 и 3 представлены отдельные трассы, полученные при одинаковом положении антенн по оси X для первого и второго вариантов моделирования.

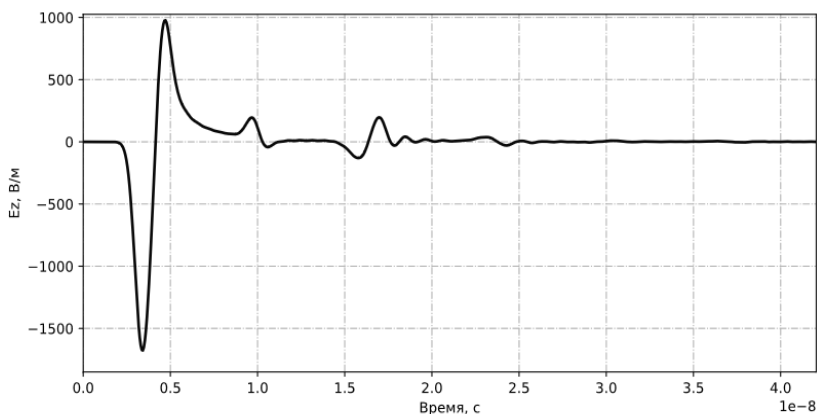


Рис. 2. Радиолокационный профиль для одного из положений антенн (А-скан) при отсутствии проводящих объектов в верхнем полупространстве

Импульсы на интервале времени 3–7 нс представляют собой сигналы прямого прохождения между антеннами. Волны, отраженные от границ раздела слоев, соответствуют временным интервалам на профилях 8–12, 15–20 и 22–26 нс.

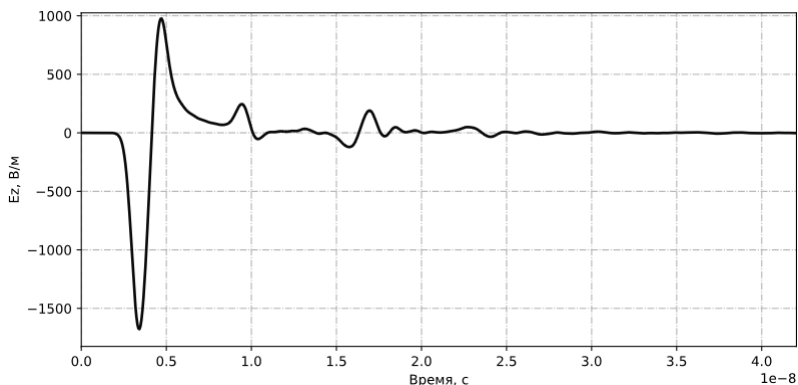


Рис. 3. Радиолокационный профиль для одного из положений антенн (А-скан), полученный при наличии проводящих объектов в верхнем полупространстве

Сравнивая оба профиля, можно видеть, что отражению зондирующего импульса от проводящего объекта соответствует импульс на временном интервале 13–15 нс (см. рис. 3). По результатам моделирования были получены радарограммы для первого (рис. 4) и второго вариантов (рис. 5).

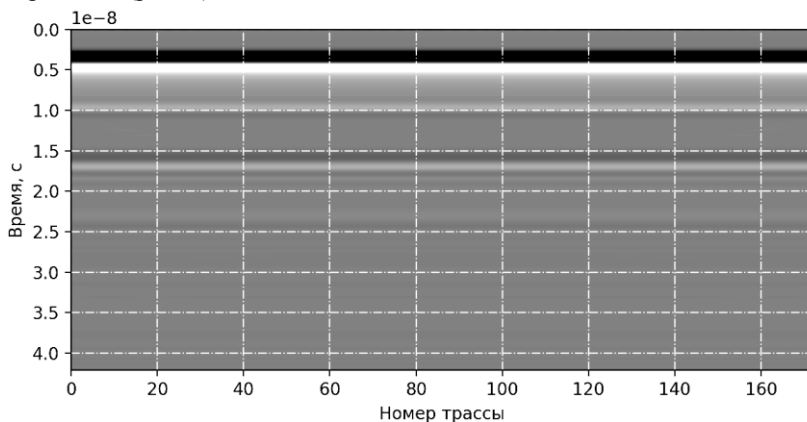


Рис. 4. Радарограмма, полученная при отсутствии проводящих объектов в верхнем полупространстве

Из сравнения полученных радарограмм видно, что наличие в верхнем полупространстве проводящих объектов, отражающих зондирующие импульсы, приводит к появлению дифрагированных волн, изображенных на радарограмме в форме гипербол, положение вершин которых соответствует положению проводящего объекта.

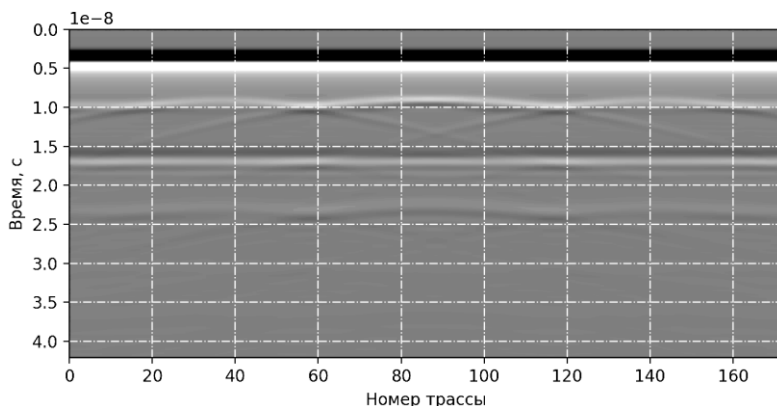


Рис. 5. Радарограмма, полученная при наличии проводящих объектов в верхнем полупространстве

В данной работе в программном обеспечении gprMax было выполнено численное моделирование для оценки влияния проводящих объектов, расположенных в верхнем полупространстве, на результаты георадиолокационного исследования при использовании георадара в условиях горной выработки. На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что объекты, расположенные в верхнем полупространстве, являются причиной появления дифрагированных волн, и при большом количестве таких объектов интерпретация радарограммы может оказаться затрудненной. Таким образом, при использовании георадара в условиях горной выработки следует учитывать влияние проводящих объектов в верхнем полупространстве и по возможности, не располагать антенны вблизи таких объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Warren C. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar / C. Warren, Giannopoulos A., Giannakis I. // Computer Physics Communications. – 2016 – Vol. 209. – P. 163–170.
2. Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпунин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; под ред. М.И. Финкельштейна. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
3. gprMax User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.gprmax.com/en/latest/index.html> (дата обращения: 25.02.2021).