

Том II, с. 320–323

УДК: 537.87:523

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ АНАЛОГА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕОРАДАРА ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛУНОХОДА

Р. А. Рудаменко<sup>1</sup>, В. Н. Марчук<sup>1</sup>, А. С. Бажанов<sup>2</sup>, Ю. В. Арнаутов<sup>2</sup>, А. П. Местертон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

E-mail: marchuk@ms.ire.rssi.ru

<sup>2</sup> ФГУП СКБ ИРЭ РАН, 420111, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

E-mail: bajanov@sdbireras.ru

**Аннотация.** Целью данной работы являлось проведение полевых испытаний аналогов георадара для радиолокационного комплекса лунохода и сравнительный анализ результатов. Для этого была разработана Методика проведения испытаний, подготовлен полигон на основе предварительно сформированных требований, проведены испытания в соответствии с Методикой, произведены обработка и анализ полученных данных.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн; подповерхностные структуры; радиофизические методы; радиолокация; георадары

## ANALYSIS OF FIELD TEST RESULTS OF THE HIGH FREQUENCY GPR PROTOTYPE FOR LUNAR ROVER RADAR SYSTEM

R. A. Rudamenko, V. N. Marchuk, A. S. Bazhanov, Yu. V. Arnautov, A. P. Mesternon

**Abstract.** The purpose of this work was to conduct field tests of GPR analogues for the radar complex of the lunar Rover and a comparative analysis of the results. The method of testing was developed, the polygon was selected on the basis of pre-formed requirements, experiments were carried out in accordance with the specified procedure, processing and analysis of the data was performed.

**Keywords:** radio wave propagation; sub-surface structure; sensing methods; radar; GPR

### Введение

Данная работа проводилась в рамках программы подготовки научной аппаратуры для исследования Луны. Для разведки запасов воды и природных ископаемых предлагается проводить подповерхностную радиолокацию грунта Луны как с орбитальных аппаратов, так и с роверов (луноходов). С орбитальных аппаратов предполагается производить в первую очередь поиск залежей сырья для термоядерных станций, выбора мест с прочной ровной поверхностью для будущих поселений. С луноходов можно производить более тщательное и детальное изучение внутренней структуры грунта, оконтуривание подповерхностных трещин, пустот и участков с аномальными значениями плотности или проводимости. Для этого нужно производить площадную георадарную съемку с поверхности многоканальной радарной системой.

Кроме того, с использованием данных георадара возможно решение следующих задач: определение глубинного профиля плотности верхнего слоя грунта; оценка толщины и плотности реголита; определение структуры грунта Луны: наличия глубинных слоев и неоднородных вкраплений; оценка радиофизических свойств исследуемой среды: диэлектрической проницаемости и проводимости (поглощающей способности) вдоль трассы движения георадара и распределение их по глубине; выбор наиболее перспективных мест для проведения бурения; отслеживание глубины залегания и поведения различных слоев, уточненных по результатам бурения; оценка процентного содержания оксидов металлов.

Целью данной работы являлось проведение полевых испытаний аналогов георадара для радиолокационного комплекса лунохода и сравнительный анализ результатов. Рассматривались два вида георадаров: высокочастотный с центральной частотой зондирования 2200 МГц, предназначенный для исследования приповерхностных слоев на глубинах до 2 метров, и низкочастотного с центральной частотой 200 МГц для зондирования на глубину 5 и более метров. Для этого была разработана Методика проведения испытаний, подготовлен полигон на основе предварительно сформированных требований, проведены испытания в соответствии с Методикой, произведены обработка и анализ полученных данных. В данной работе рассмотрены результаты испытаний высокочастотного георадара.

#### Аппаратура использовавшаяся при проведении сравнительных испытаний

В качестве аналога высокочастотного георадара использовался разработанный в ФГУП СКБ ИРЭ РАН и ФИРЭ РАН георадар «Герад-2200». Внешний вид георадара представлен на Рис. 1. Прибор состоит из антенного блока, совмещенного с блоком электроники и планшетного компьютера, предназначенного для питания, управления, сбора и хранения радиолокационных данных.



Рис. 1. Внешний вид георадара «Герад-2200».

На Рис. 2а показан вид излучаемого сигнала, а на Рис. 2б – его спектр. Сверхширокополосный сигнал ВЧ георадара состоит из одного периода колебаний (расстояние между минимумами 0.5 нс), длительность импульса порядка 1 нс. Рабочая полоса частот лежит в районе от 1.5 до 2.5 ГГц, ширина спектра  $\Delta f = 1\text{ ГГц}$ . Потребляемая мощность менее 150 мВт, выходная мощность -45 дБм/МГц.

#### Проведение испытаний и анализ полученных результатов

В качестве испытательного полигона использовался строящийся участок резервного полотна трассы Москва-Калуга, расположенный вблизи г. Троицк. Дорога покрыта слоем асфальта, под которым размещены слои песка и щебенки, используемые для выравнивания поверхности грунта,

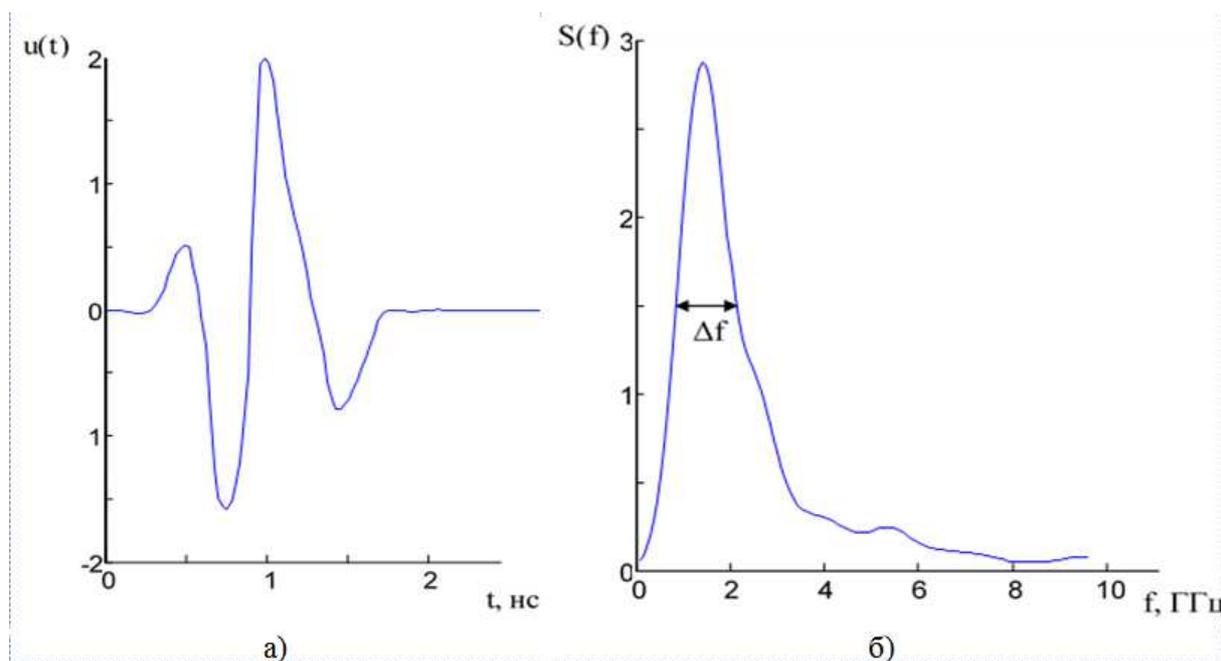


Рис. 2. Вид излучаемого сигнала (а) и спектра (б) георадара «Герад-2200».

соответственно наличие слоистой структуры полигона гарантировано строительными нормами для автомобильных дорог.



Рис. 3. Участок профиля 1: 250 – 300 м. (с выходом на мост в конце профиля).

Измерения проводились на протяженном участке трассы длиной 300 м. Было выполнено профилирование заданного участка дважды (на случай возможных помех) примерно по одному и тому же пути. Процесс проведения экспериментов протоколировался фотосъемкой. На участке много строительной техники, воздушные отражения от которой могут являться источником помех. В результате измерений были получены два файла данных объемом 14.3 Мбайт каждый. В первом файле количество выборок составило 14254, во втором – 14280, среднее расстояние между выборками – 2 см (задавалось работой датчика пути).

Пример обработки полученных результатов представлен на Рис. 3. Приведены результаты обследования 50-метрового участка дорожного полотна, последние 10 метров которого выходят на железобетонный мост. На радарограмме выделены отражения, полученные от различных слоев: на 20 см – от нижней границы асфальта, в районе от 30 до 50 см – от слоя песка, в районе от 60 до 90 см – от слоя щебня. Вертикальной линией показана граница перехода на железобетонный мост. Объекты, ниже 120 см вероятнее всего являются ложными целями, обусловленными отражениями от строительной техники, расположенной у края дороги.

#### Заключение

- На полученных радарограммах просматриваются слои на разных глубинах: от 20 см до 1.5 м.
- Переход с асфальтовой дороги на железобетонный мост уверенно фиксируется.
- Воздушные отражения от строительной техники затрудняют анализ и интерпретацию полученных данных
- Испытания макетов георадаров проводились после недели дождей (был выбран один день, когда осадков не было), поэтому наличие локальных подповерхностных неоднородностей могут быть обусловлены неравномерным высыханием грунта. Очевидно, что в условиях зондирования грунта Луны влияние влаги будет отсутствовать, поэтому следует ожидать более контрастного отображения границы между различными слоями лунного грунта.

#### Список литературы

1. G. Y. Fang et al. Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission // *Research in Astronomy and Astrophysics* 2014 Vol. 14 No. 12, P. 1607–1622
2. Marchuk V. N. , Smirnov V. M., Byshevski-Konopko O. A. Multi-channel ground penetrating radar for space applications // *The third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>)*, Moscow 8-12 October 2012 abst 270-271.
3. В.Н.Марчук. Результаты расчета диаграммы направленности антенны на границе двух сред. // *Международ. научно-практ.кон «Инженерная геофизика-2005»*. Тезисы доклада, Геленджик, 27 марта – 2 апр. 2005г. с.215
4. Марчук В.Н., Секистов В.Н., Смирнов В.М, Юшкова О.В. Моделирование работы георадара численными методами // *Наукоемкие технологии*. 2006. Т.7. № 10, С.39-52
5. Марчук В. Н., Смирнов В. М., Юшкова О. В., Бышевский-Конопко О. А., Бажанов А.С., Бездудный В. Г. Результаты обработки радиолокационных данных многоканального 3d-георадара // *«Журнал радиоэлектроники»*, 2013, № 1, <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/6/text.pdf>
6. Смирнов В.М., Марчук В.Н., Юшкова О.В., Бышевский-Конопко О.А., Бажанов А.С, Бездудный В.Г. Обработка радиолокационных данных многоканального 3D-георадара // *труды VI Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь»*, Москва, 19-22 ноября 2012 г., CD