
Антенны, распространение радиоволн и техника СВЧ

УДК 550.837.76; 528.516

Результаты испытаний прототипа георадара воздушного базирования

© Авторы, 2019

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2019

Д.Е. Едемский – к.т.н., ст. науч. сотрудник,

Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: deedemsky@gmail.com

А.В. Попов – д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник,

Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: popov@izmiran.ru

И.В. Прокопович – науч. сотрудник,

Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: prokop@izmiran.ru

В.А. Гарбацевич – зав. лаборатории,

Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: nro@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Размещение георадиолокационной системы на летательном аппарате позволяет существенно расширить область применения этого геофизического метода и упростить проведение крупномасштабных обследований опасных и труднодоступных территорий, где применение традиционных наземных методов ограничено.

Цель. Провести доработку аппаратуры, компьютерное моделирование и экспериментальные работы по тестированию оборудования на полигоне, а также первые натурные полеты с разработанными макетами.

Результаты. С использованием опыта наземного зондирования была модернизирована аппаратура коммерческого георадара и создан макет бортового подповерхностного локатора. Выбор антенной системы был осуществлен на основе численного моделирования нескольких конфигураций взаимного размещения передающей и приемных антенн и летательного аппарата. Лабораторные эксперименты по проверке работоспособности системы были проведены на строительной площадке с применением подъемного крана для позиционирования измерительного комплекса в воздухе над зондируемой поверхностью. Были зарегистрированы сигналы от объектов как на поверхности земли, так и в подповерхностной среде. Выполнено численное моделирование для интерпретации результатов этих экспериментов, полученные модельные радарограммы хорошо соответствуют полевым данным и помогают соотнести отраженные сигналы с конкретными объектами эксперимента (элементами здания, подъемным краном, слоями грунта). Эти предварительные эксперименты дали возможность оценить уровень паразитных отражений от внешних объектов, что помогло распознать сигналы от подземных объектов при георадарных съемках в реальных условиях. Тем самым было показано, что разрабатываемый локационный комплекс может быть использован для исследования подземных структур в грунте при достаточном удалении от поверхности земли. В дальнейшем были проведены натурные измерения с радиолокационной аппаратурой, размещенной под вертолетом.

Практическая значимость. Обнаружение подповерхностных объектов подтверждает эффективность разработанной аппаратуры и возможность применения бортового георадара для обследования подстилающей поверхности в реальных условиях.

Ключевые слова

Георадар, подповерхностное зондирование, вертолет.

Авторы благодарят руководство аэродрома Большого Грызлово и лично Д.А. Киселева за предоставленный летательный аппарат и активное содействие в проведении работ.

Эта статья посвящается памяти В.В. Копейкина – пионера работ ИЗМИРАН по аэрогеолокации [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00185.

DOI: 10.18127/j00338486-201909(13)-05

Введение

Георадиолокация широко используется при геофизических исследованиях в геологии, гляциологии, археологии, разведке полезных ископаемых и т.д. Однако для крупномасштабных обследований труднодоступных территорий, покрытых густой растительностью, традиционных наземных методов обследования недостаточно. С учетом этих ограничений в качестве альтернативы может быть использована георадиолокационная система, установленная на летательном аппарате. В настоящее время разработка такой аппаратуры и методик георадарной съемки ограничена узкой областью исследований – гляциологией. Известны отдельные эксперименты по применению георадара для зондирования поверхности земли с борта летательного аппарата, но широкого распространения данная методика пока не нашла [3].

В России и за рубежом применяются вертолетные системы с георадаром для работ по исследованию ледников и снежного покрова (определению толщины льда, снега, локализации трещин и полостей) в Антарктиде, Гренландии, Аляске и т.д. В Институте географии РАН разработан и активно используется георадар ВИРС для зондирования ледников Кавказа, Шпицбергена и др. как в наземном варианте, так и в качестве подвески к вертолету [1, 8]. Различные системы для сбора георадарной информации с вертолета, которые были недавно протестированы на ледниках в Швейцарских Альпах, включали в себя буксируемые системы (HERA-G+ и BGR-P30) или жестко закрепленные стандартные коммерческие наземные георадары (GSSI и PulsEKKO), работающие в диапазоне частот от 30 до 70 МГц [10–14].

Применение воздушного георадара может быть расширено как для решения задач мониторинга потенциально опасных территорий, так и для исследования засушливых районов и зоны вечной мерзлоты. Для этого необходимо продвигать исследования в данном направлении путем усовершенствования характеристик аппаратурной части и разработки соответствующих методик и программного обеспечения.

Ц е л ь р а б о т ы – провести доработку аппаратуры, компьютерное моделирование и экспериментальные работы по тестированию оборудования на полигоне, а также первые натурные полеты с разработанными макетами.

В статье описаны дизайн и технические особенности резистивно-нагруженной антенной системы. Затем приведен эксперимент на полигоне с приподнятым над землей георадаром. Результаты эксперимента интерпретируются с помощью численного моделирования. Представлены и обсуждаются результаты тестовых полетов на вертолете Ми-2 с макетом георадарной подвески.

Широкополосная резистивно-нагруженная дипольная антенна

Измерительная система состоит из резистивно-нагруженных антенн, передающего и приемного устройств, размещенных на соответствующих антеннах, и находящегося в кабине вертолета блока регистрации и управления, с помощью которого осуществляется синхронизация и управление работой всего измерительного комплекса через систему WiFi (рис. 1). Антенная система является ключевой частью устройства аэрогеорадара.



Рис. 1. Фото аэрогеорадарного комплекса
Fig. 1. Airborne GPR system photo

Предложенная Р. Кингом дипольная антенна с резистивной распределенной нагрузкой [4] замечательна тем, что при правильно выбранном законе возрастания удельного сопротивления в антенне формируется бегущая волна тока, затухающая во всем диапазоне рабочих частот, в то время как у обыкновенного (классического) диполя волновая форма тока имеет осциллирующий характер. Радарограммы, получаемые с помощью апериодического сигнала возбуждения, обладают существенно лучшим качеством по пространственному и временному разрешению, чем при использовании осциллирующего возбуждающего сигнала.

При разработке антенной системы для ге-

орадара воздушного базирования было решено развивать идею резистивно-нагруженных антенн, используемых для наземного георадара [2]. Такие антенны представляют собой металлизированные пластины, соединенные между собой нагрузочными сопротивлениями, распределенными вдоль антенного полотна по гиперболическому закону. Длина плеча антенны составляет 3 м, ширина полотна антенны 0,3 м, георадар работает в диапазоне 10...50 МГц, наиболее благоприятном для обеспечения глубины зондирования порядка 20...30 м в грунтах средней полосы России.

При работе в диапазоне частот 10...50 МГц крайне важен учет таких факторов, как размеры антенной системы, относительное взаимное расположение антенн в пространстве, их положение относительно вертолета, а также аэродинамика всего измерительного комплекса. Анализ и разработка антенной системы проводились с применением MMANA-GAL-PRO – программного комплекса для создания, редактирования, анализа и расчета антенн [9].

Компьютерное моделирование георадарных антенн позволило выполнить следующее: по распределению токов в полотне антенны подобрать нагрузки в резистивно-нагруженных диполях; рассчитать диаграммы направленности антенн на фиксированных частотах; проанализировать эффективность применения нужного диаметра проводников в полотне антенны; рассчитать взаимное влияние приемной, передающей антенн и вертолета. При компьютерном моделировании вертолет учитывался как проводящий цилиндр радиусом один метр, а плечо антенны – как десять проводников, соединенных резистивной нагрузкой. Конфигурация размещения приемной и передающей антенн оказывает значительное влияние на диаграмму направленности (ДН) георадарного комплекса и может приводить к существенному ее искажению (рис. 2, а и б).

Изготовленный резистивно-нагруженный диполь имеет равномерное распределение коэффициента стоячей волны (КСВ) по всему диапазону частот в пределах 2,5...3,0, что приводит к изменению коэффициента усиления антенны в диапазоне -24...-13 дБ. При анализе токов в антенне путем расчета и подбора параметров распределенной нагрузки удалось избежать резонансных явлений в антенне (рис. 2, в). При увеличении расстояния между антеннами до значений больше, чем $\lambda/2$, удалось свести к приемлемому минимуму низкочастотную составляющую сигнала (1) на рис. 2, з, то есть «слепую» зону радара.

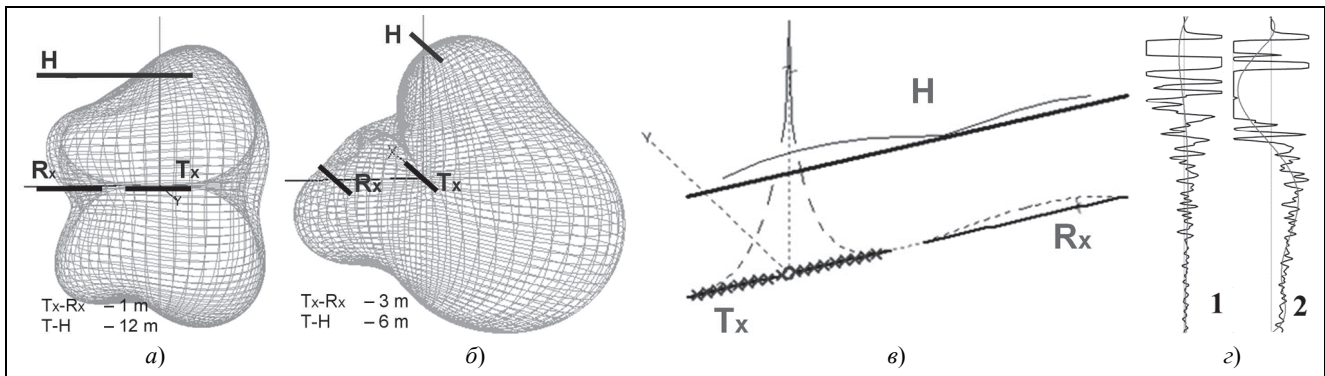


Рис. 2. Графическое отображение моделирования ДН антенн георадара на частоте 25 МГц: а – антенны в одну линию; б – параллельно расположенные антенны; в – диаграмма распределения токов в антенне; г – «А»-скан, где 1 – расстояние между антеннами равно λ ; 2 – расстояние между антеннами меньше $\lambda/2$; TX – передатчик; RX – приемник; Н – вертолет

Fig. 2. Modeling of GPR antenna radiation patterns at 25 MHz frequency: а – one-line at antennas design; б – parallel antennas design; в – current distribution in antenna; г – A-scans, where 1 – distance between the antennas equals the operating wavelength; 2 – distance between the antennas is half-wavelength; TX – transmitter; RX – receiver; Н – helicopter

Испытания измерительного комплекса. Численное моделирование

Для проверки эффективности работы радара и оценки возможности его практического применения были проведены эксперименты на строительной площадке с использованием башенного подъемного крана высотой и длиной стрелы 40 м. На рис. 3, а приведена схема постановки эксперимента. В 7 м от вертикали подъема антенны располагался железобетонный каркас первого этажа здания (высота 3 м). Подпо-

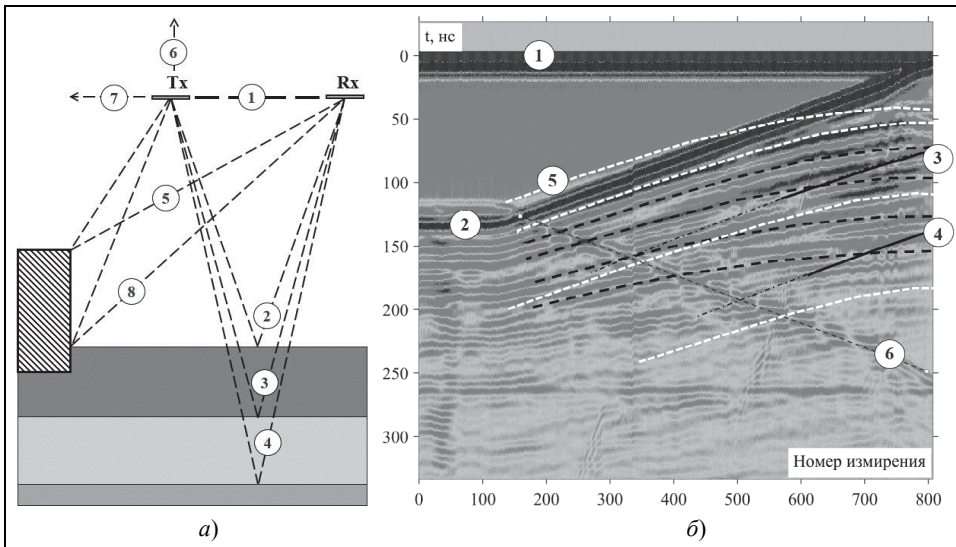


Рис. 3. Зондирование с плавным изменением высоты подвеса антенны: *a* – геометрия постановки эксперимента; *б* – результаты зондирования, «Б»-скан; 1 – зондирующий импульс; 2 – сигнал от поверхности земли; 3 – сигнал от границы слоя на глубине 2,5 м; 4 – сигнал от границы слоя на глубине 4 м; 5 – сигнал от угла здания; 6 – сигнал от стрелы крана; TX – передатчик; RX – приемник

Fig. 3. Probing with a smooth change in the lifting height of the GPR antennas: *a* – geometry of experiment; *b* – experimental results of probing, B-scan; 1 – probing pulse; 2 – signal from the ground surface; 3 – signal from the interface at a depth of 2.5 m; 4 – signal from the interface at a depth of 4 m; 5 – signal from the corner of the building; 6 – signal from the crane boom; TX – transmitter; RX – receiver

верхностная среда представляет собой суглинок, верхний слой которого (частично) на глубину ~2 м был снят под монтаж цокольного этажа здания с последующей засыпкой грунтом. В данном эксперименте антенна плавно опускалась к земле с высоты 20 м.

Для анализа данных зондирования и подтверждения интерпретации принятых сигналов было проведено двумерное моделирование средствами программного обеспечения grgMax, широко используемого для моделирования электромагнитных сигналов георадарного зондирования [9]. Структура грунта мо-

делировалась плоскослоистой подповерхностной средой с двумя границами раздела на глубине 2,5 м ($\epsilon_1 = 14$) и 4 м ($\epsilon_2 = 9$). В качестве зондирующего импульса была взята модель «gaussiantdot» – первая производная функции Гаусса $\epsilon_1 = -4\pi^2 f^2 (t - 1/f) \exp(t - 1/f)^2$ с центральной частотой 25 МГц.

Результаты моделирования «Б»-скана для сигналов без учета влияния здания приведены на рис. 4, *a*, а с учетом влияния здания – на рис. 4, *б*.

Судя по результатам моделирования, максимальные по амплитуде сигналы поступают от внешних объектов. Сигналы от поверхности земли 2 и здания 5, 8 превышают на 16 дБ уровень сигнала 3 от границы слоя на глубине 2,5 м и на 49 дБ уровень сигнала 4 от границы слоя 4 м. При размещении антенны выше 10 м над поверхностью земли амплитуда сигналов от внутренней структуры подстилающей поверхности становится слишком малой на фоне сигналов от внешних объектов для их уверенной регистрации.

Приведенная двумерная модель относительно проста, но при сопоставлении результатов моделирования (рис. 4) с экспериментальными данными (рис. 3, *б*) можно отметить, что результаты моделирования в целом соответствуют характеру отражений на реальном профиле. Поскольку при моделировании рассматривалась только двумерная модель (плоскость антенны перпендикулярна поверхности земли), все сигналы от объектов, лежащих вне данной плоскости, не нашли своего отражения в модели. В реальности значимый вклад в радарограмму вносят отражения от линий примыкания боковых стен здания к земле, расположенных на расстоянии 6, 11, 17 м от проекции антенны на землю (эти сигналы на рис. 3, *б* выделены черной пунктирной линией). Уровень данных сигналов 8 на 12...15 дБ ниже уровня сигнала, отраженного от поверхности земли 2, но на 23 дБ выше уровня сигнала от внешнего угла здания 5 (рис. 3). Сигналы от стрелы крана 6, видные на рис. 3, по результатам измерений на 12 дБ ниже уровня отражений от поверхности земли 2 при высоте подъема антенны и расстояния до стрелы, равных 20 м.

Для идентификации сигналов от подземных структур и выделения сигналов от строительных конструкций были использованы данные, полученные при вращении антенны на 360° (рис. 5, *a*, где вертикальной пунктирной линией отмечено положение антенн, направленных перпендикулярно стене дома и параллельно стреле крана). Цифрами 1 и 2 отмечены зондирующий импульс и импульс, отраженный от

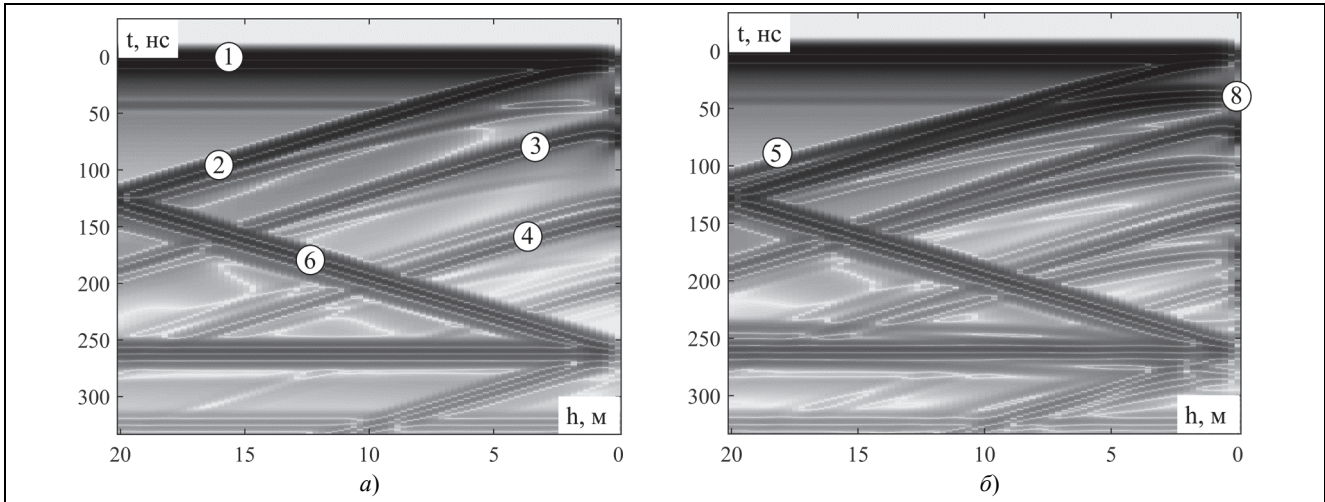


Рис. 4. Графическое отображение результатов моделирования эксперимента: *a* – подповерхностная среда два слоя, глубина залегания границ слоев 2,5 и 4 м; *б* – подповерхностная среда два слоя, здание высотой 3 м на расстоянии 7 м; 1 – зондирующий импульс; 2 – сигнал от поверхности земли; 3 – сигнал от границы слоя на глубине 2,5 м; 4 – сигнал от границы слоя на глубине 4 м; 5 – сигнал от внешнего угла здания; 6 – сигнал от стрелы крана; 8 – сигнал от линии примыкания стена-земля; *h* – высота подъема георадара над поверхностью земли

Fig. 4. Results of numerical simulation: *a* – subsurface medium consists of two layers with thickness 2.5 and 4 m respectively; *b* – subsurface medium consists of two layers and three meter high building at a distance 7 m; 1 – probing pulse; 2 – signal from the ground surface; 3 – signal from the interface at a depth of 2.5 m; 4 – signal from the interface at a depth of 4 m; 5 – signal from the corner of the building; 6 – signal from the crane boom; 8 – signal from the wall-ground boundary line; *h* – lifting height of GPR above ground

поверхности земли, соответственно. Сигналы от стрелы крана 6 максимальны по амплитуде при параллельном размещении стрелы и антенн, а сигналы от вертикальной мачты крана 7 – при перпендикулярном размещении антенны относительно стрелы крана.

При повороте антенн на 360° (рис. 5,а) отражения от локальных объектов, находящихся в горизонтальной плоскости антенн, будут иметь прерывистый характер (как и от объектов, имеющих вытянутую структуру и расположенных в верхней и нижней полусферах антенн). Можно утверждать, что только отражения от субгоризонтальных контрастных поверхностей (поверхность земли и границы раздела сред) при учете их плоскопараллельной стратификации должны быть относительно стабильны по амплитуде при вращении антенн. На рис. 5,б приведен график усредненных значений «А»-сканов при повороте антенн на 360°: пунктирной линией приведены данные о среднем абсолютном значении отклонений отдельных точек от среднего. На графике выделены сигналы 4 и 5 (времена задержки 110 нс и 137 нс соответственно), которые имеют максимальную амплитуду

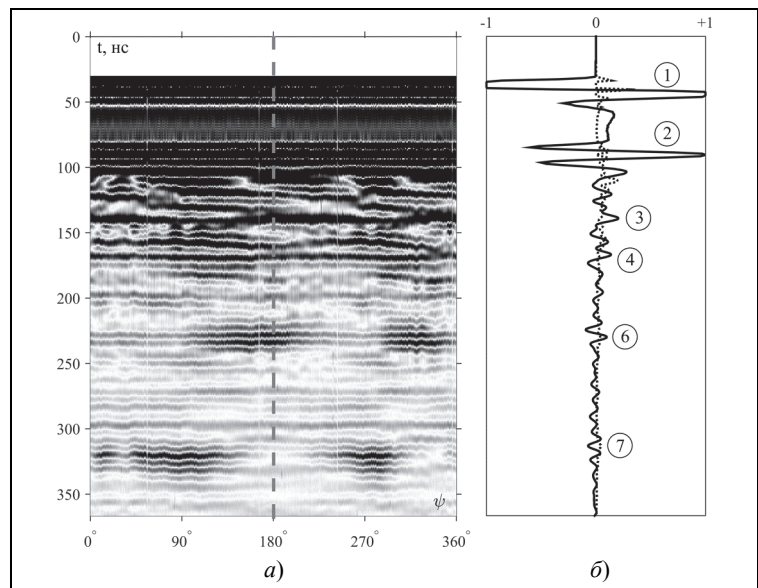


Рис. 5. Зондирование с разворотом антенны на 360°: *a* – результаты измерений, «Б»-скан; *б* – «А»-скан (сплошная линия – усредненный по профилю, линия точками – среднее абсолютное значение отклонений отдельных точек от среднего); 1 – зондирующий импульс; 2 – сигнал от поверхности земли; 3 – сигнал от границы слоя на глубине 2,5 м; 4 – сигнал от границы слоя на глубине 4 м; 6 – сигнал от стрелы крана; 7 – сигнал от башни крана

Fig. 5. Probing with 360° antenna rotation: *a* – results of measurements, B-scan; *b* – A-scans (solid line – profile average A-scan, dot line – average absolute deviation of individual points from the mean); 1 – probing pulse; 2 – signal from the ground surface; 3 – signal from the interface at a depth of 2.5 m; 4 – signal from the interface at a depth of 4 m; 6 – signal from the crane boom; 7 – signal from the crane tower

и при этом минимальные отклонения уровня сигнала в отдельных точках от среднего. А на радарограмме, представленной на рис. 5,а, на данных задержках наблюдается непрерывный сигнал при повороте антенн на 360°. Эти сигналы при средней скорости распространения волны в характерных для Подмосквья грунтах соответствуют глубинам залегания слоев 2,5 и 4 м. Уровень сигнала от данных слоев подтверждает возможность проведения зондирования подстилающей поверхности с помощью разработанного макета бортового радара.

Результаты натуральных экспериментов

Проверка работы георадара воздушного базирования и антенной системы в реальных условиях была проведена в окрестности аэродрома Большое Грызлово Калужской области с использованием вертолета Ми-2 [6]. Выбор места определялся доступностью летательного аппарата, любезно предоставленного руководством аэродрома.

Под измерительный комплекс был разработан и изготовлен стеклопластиковый каркас специальной формы с учетом аэродинамики воздушных потоков, формируемых винтом вертолета и встречным потоком воздуха. Антенны с центральной частотой 25 МГц смонтированы в пластиковом каркасе, который четко стабилизирует антенную систему в горизонтальном положении. Подвеска размещалась на капроновых тросах под вертолетом на расстоянии 12 м. В качестве передающего устройства использовался мощный импульсный 10 кВ передатчик на базе высоковольтного газового разрядника, работающего в асинхронном режиме; ширина импульса составляла порядка 7 нс, частота следования импульсов 1 кГц [5, 7]. Приемник прямого преобразования сигнала с полосой пропускания 20...350 МГц и 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем обеспечивал частоту оцифровки входного сигнала 1 ГГц, синхронизация приемного устройства осуществлялась по воздушному сигналу передатчика. Период одного цикла измерения равен 100 мс. Регистрация и передача данных, а также управление процессом измерения осуществлялось оператором по сети WiFi с компьютера из кабины пилота.

Грунты в районе аэродрома представлены суглинками со слабой стратификацией, то есть без резких радиоконтрастных границ, с $\epsilon \sim 14$, и $\rho = 0,01 \dots 0,1$ См/м. Полеты проходили на высоте от 10 до 70 м (относительно подвески) над зондируемой поверхностью. Было проложено несколько трасс над близлежащими полями, погребенными оврагами и прудом на ручье Бредейский отвершек.

Результаты измерений с помощью бортового радара с борта вертолета Ми-2 приведены на рис. 6,а. Трасса полета проходила над полем, автомобильной дорогой и заброшенными силосными ямами, она приведена на спутниковом изображении (рис. 6,б). Высота полета составляла 45 м. Вдоль дороги проходят три высоковольтные линии электропередач на расстоянии 28, 13 и 14 м от оси дороги с твердым покрытием, высота подвеса проводов 6 м. На георадарном профиле наблюдаются три гиперболы 1–3 отражений зондирующего сигнала от этих ЛЭП. По характеру изменения амплитуды сигнала от вершины

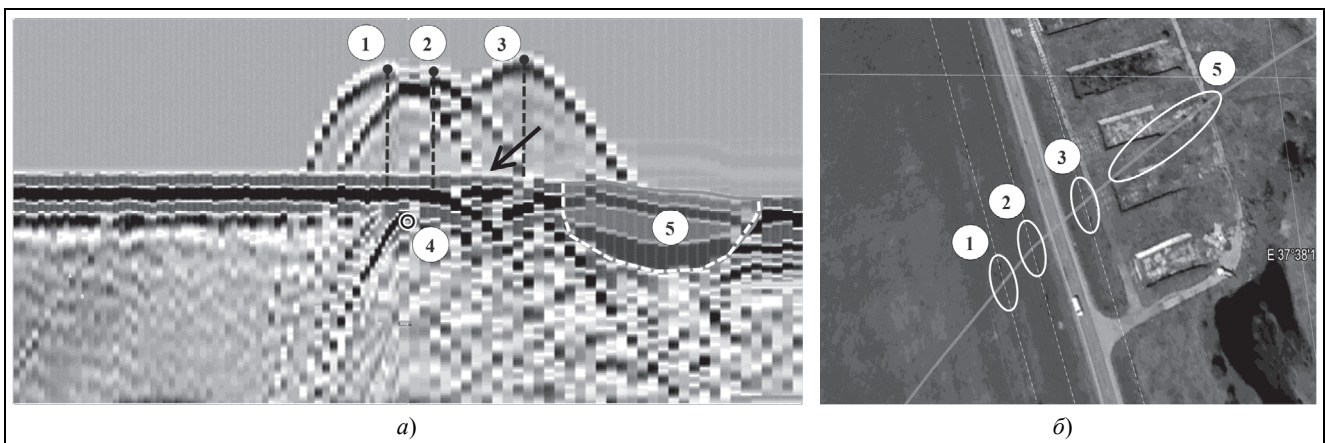


Рис. 6. Зондирование поверхности земли с вертолета: а – результаты зондирования, «Б»-скан; б – спутниковое изображение GoogleEarth фрагмента трассы полета вертолета; 1–3 – ЛЭП 3 кВ; 4 – кабель; 5 – силосная яма; «↙» – дорога

Fig. 6. Probing of the ground surface from a helicopter: a – results of probing, B-scan; b – GoogleEarth satellite image of the helicopter flight path; 1–3 – air power lines; 4 – ground wire; 5 – silage pit; «arrow» shows a road

гиперболы вдоль ее крыльев можно утверждать о симметричной форме ДН антенной системы и отсутствии выраженной направленности ДН в сторону земли: амплитуда на крыльях гиперболы выше амплитуды в вершине на 20...35%.

Силосные ямы длиной 32 м располагались вдоль дороги на расстоянии 30 м. Радиообраз силосной ямы 5 хорошо прорисован на радарограмме (рис. 6,б), подошва засыпанной грунтом ямы расположена на глубине порядка 2 м (при $\varepsilon = 14$) с уклоном в направлении от дороги. Автомобильная дорога на радарограмме прорисована плохо из-за большого шага измерений (порядка 2,5 м), однако гиперболы от обочины дороги достаточно четко позиционируют ее расположение на радарограмме. С левой стороны от дороги между ЛЭП на глубине 70 см находится локальный объект – предположительно кабель, если судить по характеру сигнала и форме гиперболы.

Из приведенных данных видно, что все основные объекты по трассе пролета зарегистрированы радаром воздушного базирования и их радиообразы представлены на радарограмме. Субгоризонтальных контрастных границ в подстилающей поверхности на поле на глубинах до 5...10 м не зарегистрировано ввиду их отсутствия, что подтверждено наземными измерениями. Достаточно уверенно в результате измерений по другим профилям фиксировались погребенные овраги и дно озера.

Заключение

Проведенные эксперименты и представленные результаты зондирования четко выявили объекты в подповерхностной среде, что доказывает возможность применения воздушной георадарной съемки для обнаружения подземных объектов в сложных для обследования грунтах Подмоскovie.

Разработанные широкополосные резистивно-нагруженные антенны и применение бортовых георадаров повышенной мощности обеспечивают обнаружение подповерхностных объектов на глубинах до 5 м. Использование программных пакетов для создания модельных радарограмм является полезным инструментом для проверки интерпретации структуры подповерхностной среды по георадарным данным и наличия в ней скрытых радиоконтрастных объектов.

Литература

1. Берикашвили В.Ш., Василенко Е.В., Мачерет Ю.Я., Соколов В.Г. Моноимпульсный радар для зондирования ледников с оптическим каналом синхронизации и цифровой обработкой сигналов // Радиотехника. 2006. № 9. С. 52–57.
2. Гарбацевич В.А. Исследование излучателей и сигналов ионозонда и георадара для диагностики геофизических сред. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. 2008.
3. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь. 1994. 216 с.
4. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: Пер. с англ. М.: Мир. 1984. Т. 1–2.
5. Копейкин В. Авиагеорадар. М.: Троянт. 2016. 96 с.
6. Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Гарбацевич В.А. Георадар воздушного базирования // Программа Междунар. научно-технич. конф. «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности». 2019. URL = <http://seminar.rslab.ru/>.
7. Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu. Enhanced Power Ground Penetrating Radars // Proc. of 6th Internat. conf. on GPR. Sendai, Japan. 1996. P. 152–154.
8. Lavrentiev I., Kutuzov S., Vasilenko E., Macheret Y. Radioecho sounding of Caucasus glaciers // EGU General Assembly 2013. Geophys. Res. Abstr. 2013. V. 15. EGU2013-930.
9. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. 2016. V. 209. P. 163–170.
10. <https://hamsoft.ca/pages/mmana-gal.php> (дата обращения: 23.02.2019).
11. [http://www.rst-group.biz/index.php?id=100&tx_ttnews\[tt_news\]=161](http://www.rst-group.biz/index.php?id=100&tx_ttnews[tt_news]=161) (дата обращения: 23.02.2019).
12. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Aeroradar/aeroradar_inhalt.html?nn=1556086 (дата обращения: 23.02.2019).
13. <https://www.geophysical.com/antennas> (дата обращения: 23.02.2019).
14. <https://www.sensoft.ca/products/pulseseekpro/overview-pulseseekko> (дата обращения: 23.02.2019).

Поступила 5 марта 2019 г.

Prototype of airborne ground penetrating radar, field test

© Authors, 2019
© Radiotekhnika, 2019

D.E. Edemsky – Ph.D.(Eng.), Senior Research Scientist,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: deedemsky@gmail.com

A.V. Popov – Dr.Sc.(Phys.-Math.), Main Research Scientist,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: popov@izmiran.ru

I.V. Prokopovich – Research Scientist,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: prokop@izmiran.ru

V.A. Garbatsevich – Head of Laboratory,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: npo@mail.ru

Abstract

GPR deployment on a flying machine allows one to substantially extend the application area of this geophysical method and to simplify carrying out large surveys of dangerous and hard-to-reach terrains, where usual ground-based methods are hardly applied. There is a necessity to promote investigations in this direction by refining hardware characteristics and developing specific methods and software. For this purpose, we upgraded commercial ground-based subsurface sounding hardware and performed corresponding computer simulation and realistic experiments. Finally, first flights with the constructed prototypes were done with Mi-2 helicopter.

Using our experience in the developing ground-based GPR and the results of numerical simulation, an appropriate configuration of antennas and their placing on the flying machine were chosen. Computer modeling allowed us to choose an optimal resistive loading of transmitter and receiver dipoles; calculate radiation patterns on fixed frequencies; analyze the efficiency of different conductor diameters in antenna circuit; calculate cross-coupling of transmitting and receiving antennas with the helicopter.

Laboratory experiments to check the efficiency of the designed system were performed on an urban building site, using a tower crane with luffing jib to position the measuring system in the air above the ground area to be sounded. Both signals from the surface and subsurface objects were registered. To interpret the results, numerical modeling was carried out. A two-dimensional model of our experiment was simulated, it gave good results compared to the experimental data. Laboratory experiments provided an opportunity to estimate the level of spurious reflections from the external objects, which helped to recognize weak signals from subsurface objects in GPR surveys under live conditions.

The airborne GPR and its antenna system were tested in real-world conditions near the Bolshoe Gryzlovo airfield in Kaluzhskaya province. The payload was placed under the helicopter at a 12 m distance. A powerful pulse transmitter of 10 kV was used, the width of the probing pulse was about 7 ns, the repetition rate around 1 kHz. The receiver with a bandwidth of 20...350 MHz provided the sampling frequency of 1 GHz, synchronization was performed by the aerial signal. As one can see from the following data, all contrast subsurface objects along the helicopter's path were registered by the airborne GPR and their radio images can be clearly decrypted. Sub-horizontal interfaces in the near-surface ground were not observed, due to their absence at 5...10 m depths confirmed by the ground measurements. The detection of subsurface contract objects shows the efficiency of the developed hardware and applicability of the airborne GPR for real-world subsurface surveys.

Keywords

Ground penetrating radar, airborne GPR, subsurface sounding, helicopter.

The authors thank the management of the Bolshoi Gryzlovo airdrome and personally D.A. Kiselev for the provided aircraft and active assistance in carrying out the work.

This article is dedicated to the memory of V.V. Kopeikin – pioneer of IZMIRAN work on airborne geolocation [5].

This work was financially supported by the Russian Federal Property Fund in the framework of scientific project № 18-02-00185.

DOI: 10.18127/j00338486-201909(13)-05

References

1. *Berikashvili V.Sh., Vasilenko E.V., Macheret Yu.Ya., Sokolov V.G.* Monoimpul'snyy radar dlya zondirovaniya lednikov s opticheskim kanalom sinkhronizatsii i tsifrovoy obrabotkoy signalov. Radiotekhnika. 2006. № 9. S. 52–57. (In Russian).
2. *Garbatsevich V.A.* Issledovanie izluchateley i signalov ionozonda i georadara dlya diagnostiki geofizicheskikh sred. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Institut zemnogo magnetizma, ionosfery i rasprostraneniya radiovoln. 2008. (In Russian).
3. *Finkel'shteyn M.I., Karpukhin V.I., Kutev V.A., Metelkin V.N.* Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya. M.: Radio i svyaz'. 1994. 216 s. (In Russian).
4. *King R., Smit G.* Antennы v material'nykh sredakh: Per. s angl. M.: Mir. 1984. T. 1–2. (In Russian).
5. *Kopeikin V.* Aviageoradar. M.: Trovant. 2016. 96 s. (In Russian).
6. *Prokopovich I.V., Edemskiy D.E., Garbatsevich V.A.* Georadar vozdushnogo bazirovaniya. Programma Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf. «Radiolokatsionnye sistemy maloy i sverkhmaloy dal'nosti». 2019. URL = <http://seminar.rslab.ru/>. (In Russian).
7. *Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu.* Enhanced Power Ground Penetrating Radars. Proc. of 6th Internat. conf. on GPR. Sendai, Japan. 1996. P. 152–154.
8. *Laurentiev I., Kutuzov S., Vasilenko E., Macheret Y.* Radioecho sounding of Caucasus glaciers. EGU General Assembly 2013. Geophys. Res. Abstr. 2013. V. 15. EGU2013-930.
9. *Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I.* gprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar. Computer Physics Communications. 2016. V. 209. P. 163–170.
10. <https://hamssoft.ca/pages/mmana-gal.php> (data obrashcheniya: 23.02.2019).
11. [http://www.rst-group.biz/index.php?id=100&tx_ttnews\[tt_news\]=161](http://www.rst-group.biz/index.php?id=100&tx_ttnews[tt_news]=161) (data obrashcheniya: 23.02.2019).
12. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Aeroradar/aeroradar_inhalt.html?nn=1556086 (data obrashcheniya: 23.02.2019).
13. <https://www.geophysical.com/antennas> (data obrashcheniya: 23.02.2019).
14. <https://www.sensoft.ca/products/pulseseekopro/overview-pulseseeko> (data obrashcheniya: 23.02.2019).