

Н.Б. Парамонов¹, Д.Л. Шишков^{2,3}, М.Н. Зарипов^{2,3}, Г.А. Егоров¹

¹ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»

²МФТИ

³Geor.ru

N. Paramonov, D. Shishkov, M. Zaripov, G. Egorov

ОБРАБОТКА ГЕОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

OBJECT RECOGNITION AS THE TASK OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

Рассмотрен вопрос применения методов геолокации для решения задачи опорной проходимости робототехнических комплексов. Показано, что комплексная обработка информации от нескольких источников, включая геолокаторы, позволяет решать задачу проходимости с учетом неочевидных препятствий. Представлена возможность обработки геоинформации на вычислителях ряда «Эльбрус».

GPR(Ground Penetrating Radar) techniques is considered to meet the challenge of supporting the patency of robotic complexes. It is shown that the complex processing of information from multiple sources, including GPR, allows to solve the task in view of the apparent patency of barriers. Shows ability to handle geo-information on a number of calculators «Elbrus».

Ключевые слова: опознавание, системы управления, вычислительные средства.

Keywords: GPR, recognition, management, computing facilities.

Введение

Одной из важных задач управления сложными робототехническими системами является задача определения опорной проходимости. В простом случае определение проходимости сводится к поиску дороги и препятствий на ней. В более сложной постановке требуется определять наличие неочевидных препятствий на маршруте движения. В этом случае опознавание препятствий можно осуществлять с использованием геолокационных средств.

Авторами статьи предложена технология автоматизированного распознавания структуры грунта на основе данных георадара, а также написана программа, реализующая данную технологию на процессорах типа «Эльбрус», которая была успешно испытана на компьютере «Эльбрус-Монокуб».

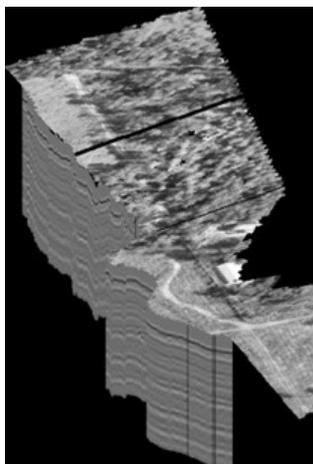


Рисунок 1. Пример георадарограммы: горизонтальная поверхность – фрагмент облака точек цифровой карты, вертикальная – георадарограмма

Постановка задачи определения проходимости методами геолокации

Решаемая авторами задача формулируется следующим образом. Есть георадарограмма, выполненная бортовым георадаром вдоль заданной траектории или при плотном сканировании ограниченной площадки. Предполагается, что георадарное сканирование осуществляется таким образом, что получение данных георадара синхронизировано с получением данных геодезического ГЛОНАСС-приемника, привязывающего данные георадарного сканирования к местности с геодезической точностью (последнее необходимо для использования данных георадара в интересах других транспортных средств). Требуется сделать вывод о структуре и несущих способностях грунта. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие действия:

- разработать алгоритм распознавания, выполняющий классификацию грунта по данным георадара;

- найти параметры алгоритма, при которых обеспечивается максимальная точность распознавания при минимальной потребности в вычислительных ресурсах, имея программную реализацию алгоритма и обучающую выборку;

- минимизировать используемый объем входных данных, обеспечивающий требуемую достоверность распознавания.

Решение задачи базируется на обоснованном предположении, что георадиолокационные данные для разных типов грунта существенно различны.

Зависимость диэлектрических свойств от структуры грунта

Возможность применения георадара для анализа структуры грунта (и тем самым оценки опорной проходимости) предопределяется контрастом диэлектрических свойств для различных грунтов. Диэлектрическая постоянная, характеризующая замедление распространения электромагнитных волн по сравнению с вакуумом, существенным образом зависит от типа грунта (табл. 1).

Таблица 1. Диэлектрическая постоянная различных типов грунтов

Тип грунта	Диэлектрическая постоянная	
	Естественная влажность	Водонасыщенные грунты
Пески	4-9	16-25
Супеси	6-16	16-25
Суглинки	9-25	16-30
Глины	16-30	20-36
Валунно-галечные отложения с песчаным заполнением	4-9	10-20
Валунно-галечные отложения с глинистым заполнением	6-16	10-25
Песчано-глинистые отложения с гравием, галькой и валунами	4-16	10-25
Скальные породы неветрелые	3-6	–
Мергели	20-30	–
Глинистые сланцы	7-10	–
Бетон	7-10	–
Воздух	1	–
Лед	3	–
Вода	81	–

Разная степень затухания электромагнитного сигнала в разных грунтах предопределяет то, что он остается информативным во льдах на десятки и сотни метров, в песках – на первые десятки метров, в глинах – на первые метры для одних и тех же частот и антенн. Каждый из выделенных материалов диагностируется по радарограмме на основании внутренней структуры радиообраза. Собранная база данных с радарограммами, дополненными данными бурения, позволяет с большой степенью уверенности диагностировать тот или иной грунт. Дополнение этой базы измерениями с помощью пенетрометров позволяет сопоставлять радарограммы с несущими свойствами грунта.

В реальных условиях мы имеем дело с различными смесями типа пески-супеси-суглинки-глины, которые неравномерно увлажнены. Диапазон изменения диэлектрических свойств для разных компонент смеси (табл. 1) предопределяет необходимость моделирования диэлектрических свойств двух- и трехкомпонентных смесей. Вместе с тем, контраст диэлектрических свойств компонент определяет сильную зависимость диэлектрических свойств смесей от их увлажнения.

В [1] приведен ряд формул, описывающих диэлектрические свойства двухкомпонентных сред (в зависимости от их структуры):

формула М. Максвелла

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} y_1; \quad (1)$$

формула В.В. Ржевского и Г.Я. Новика

$$\varepsilon_{\Sigma} = y_1 \varepsilon_1 + y_2 \varepsilon_2; \quad (2)$$

формула К. Лихтенеккера

$$\lg \varepsilon_{\Sigma} = y_1 \lg \varepsilon_1 + y_2 \lg \varepsilon_2; \quad (3)$$

формула В. Н. Оделевского

$$\varepsilon_{\Sigma} = a + \sqrt{a^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}, \quad (4)$$

где

$$a = \frac{(2y_1 - 1)\varepsilon_1 + (2y_2 - 1)\varepsilon_2}{4}. \quad (5)$$

В выражениях (1) – (5) использованы следующие обозначения: ε_i – диэлектрические проницаемости составляющих смеси; y_i – их объемные концентрации ($i=1, 2$).

Зависимость Е. И. Леонтьева для влажной глинистой породы:

$$\frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}{\varepsilon_T + 2\varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}(1 - k_{\Pi}) + \frac{\varepsilon_B - \varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}k_{\Pi}(1 - k_{\text{ГЛИ}}) + \frac{\varepsilon_{\text{ГЛ}} - \varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}{\varepsilon_{\text{ГЛ}} + 2\varepsilon_{\text{ВПГЛ}}}k_{\Pi}k_{\text{ГЛИ}} = 0, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{ВПГЛ}}$ – диэлектрическая проницаемость влажной глинистой породы; $\varepsilon_T, \varepsilon_B, \varepsilon_{\text{ГЛ}}$ – диэлектрические проницаемости твердой ненабухающей фазы, свободной воды и глинистой фракции соответственно; $k_{\Pi}, k_{\text{ГЛИ}}$ – коэффициенты общей пористости и общей глинистости.

При анализе диэлектрических свойств многокомпонентных сред очевидно, что чем больше увлажнение, тем больше диэлектрическая постоянная смеси. На рис. 2 приведены данные зависимости диэлектрических свойств различных пород от их увлажнения по данным экспериментов.

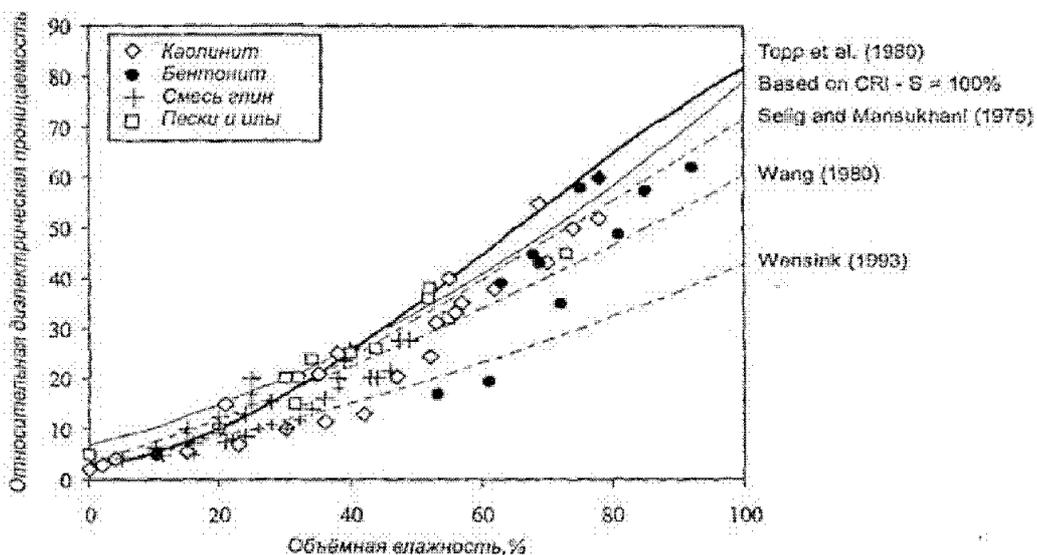


Рисунок 2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от влажности для различных сред

Для расчета зависимости диэлектрической проницаемости ϵ от влажности W существует ряд эмпирических формул [2]:

для песков и суглинков

$$\epsilon = 3,2 + 1,1W ;$$

для осадочных пород в диапазоне изменения влажности от 3 до 45 %

$$\epsilon = 3,03 + 9,3 W_{\text{об}} + 146 W_{\text{об}}^2 - 76,7 W_{\text{об}}^3 ,$$

где объемную влажность $W_{\text{об}}$ можно выразить через плотность сухой породы ρ (в г/см³)

следующим образом: $W_{\text{об}} = \frac{\rho}{100}$.

Выбор алгоритма классификации

Вышеприведённые формулы позволяют сделать два вывода:

- 1) на основании данных георадара мы можем определить структуру грунта;
- 2) существенная часть вычислений ведётся по эмпирическим формулам, связанным со структурой и видом грунта.

Это означает, что вычислительную часть целесообразно перенести в модуль распознавания, т.е. использовать исходные данные георадара. Иными словами, нам нужна технология распознавания, на вход которой поступали бы данные георадара, желательно в его исходном формате, а на выходе мы получали бы суждение о структуре грунта.

Данные георадара представляют собой двумерный массив, в котором первая координата – номер точки трека (т.е. горизонтальной траектории) георадара, вторая координата – глубина, т.е. время между моментом излучения и приёмом сигнала.

Возможны два подхода к классификации структуры грунта:

- 1) передавать на вход классификатора одномерный массив данных сканирования в

одной точке и получать, соответственно, данные о структуре грунта в данной точке;

2) передавать на вход классификатора двумерный массив данных сканирования вдоль всего трека и получать от классификатора координаты областей (фрагментов трека) с указаниями структур грунта в данных фрагментах.

Двумерный классификатор считается предпочтительным, т.к. появляются возможности:

- узнавать характерные для грунтов квазипериодические структуры;
- узнавать локализованные объекты с четкими границами;
- определять локализованное вкрапление данной структуры.

При использовании двумерного классификатора задача распознавания грунта формулируется следующим образом: дано двумерное монохромное изображение (в роли яркости пиксела – интенсивность отражённого сигнала), требуется выделить структуры, характерные для разных видов грунта.

Исходя из вида георадарограммы, плотность точек экстремумов на ней может быть очень мала либо равна нулю, т.е. алгоритмы, основанные на ключевых точках и анализе их дескрипторов, могут быть существенно неустойчивы либо неработоспособны. Поэтому выбраны алгоритмы с интегральными признаками. Поскольку мы ищем области с заданным пространственным взаиморасположением более тёмных и более светлых участков, в качестве наиболее приемлемого алгоритма будет использоваться каскад Хаара.

Экспериментально (на основе собранной авторами базы радарограмм грунтов) было определено, что для анализа структуры грунта (минимальная ошибка недостаточности и избыточности признаков при разумных требованиях к компьютерному ресурсу) требуется горизонтальное разрешение радарограммы – 20 точек на метр вдоль трека и вертикальное – 512 сканов на точку.

Авторами была создана база для каскада Хаара, обученная узнавать влажную почву, после чего данная база была применена к реальной съёмке (не входящей в обучающую

выборку). На рис. 3-8 изображены: а – карта местности, где черным цветом отрисован участок трассы левее вертикальной сетки, белым цветом, соответственно, участок правее; б – трек георадара, на котором прямоугольниками выделены области повышенной влажности. Соответственно, для карты и треков выполнена точная JPS-привязка и вершины каждого прямоугольника имеют точные JPS-координаты. На карте хорошо видны озеро и много влажных непроходимых участков возле него, которые выделяет каскад, причем влага в них подходит к поверхности. Вдали от озера есть участки с большим содержанием влаги на глубине и, наконец, есть сухие участки. Поскольку на карте (рис. 8а) «светлый участок» трассы приблизился к воде, на георадарограмме (рис. 8б) прямоугольных отметок каскада Хаара больше.

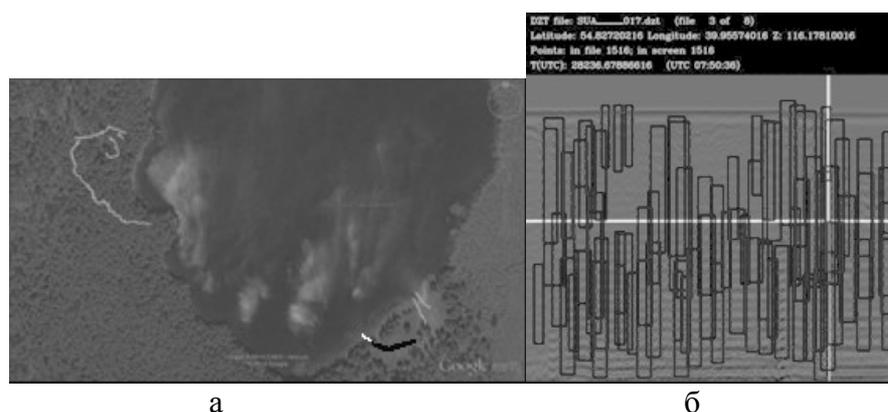


Рисунок 3а, б. Каскад Хаара показывает наличие воды в удалении от поверхности

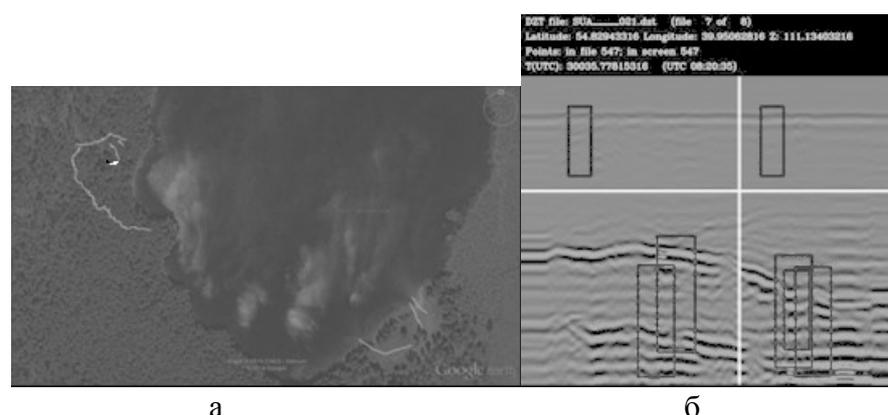


Рисунок 4а, б. Участок с минимальной влажностью на возвышении

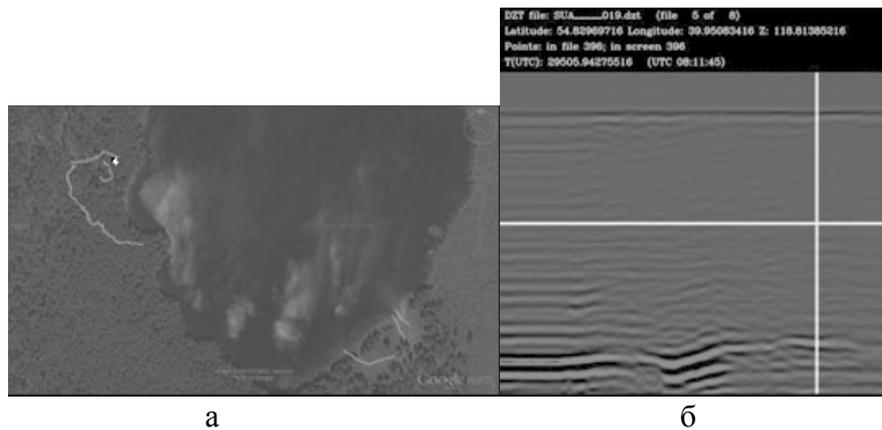


Рисунок 5а, б. Участок полностью сухой

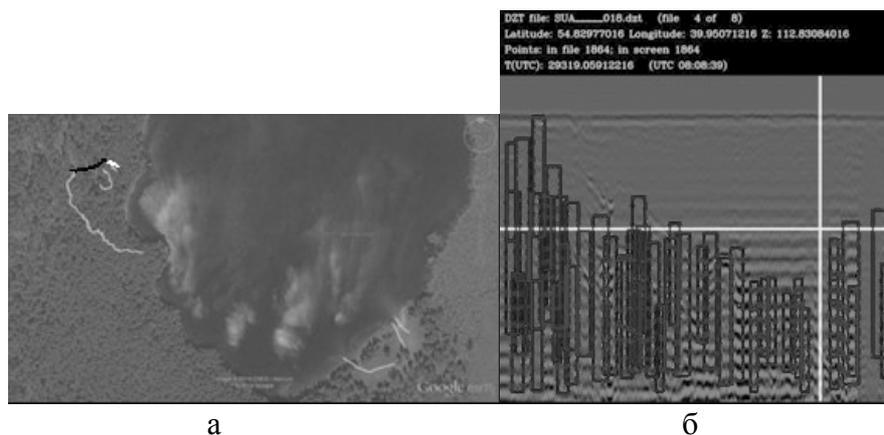


Рисунок 6а, б. Понижение грунта (см. WGS84-высоту – координата Z на рис. б) и появление грунтовых вод (пока они на глубине)

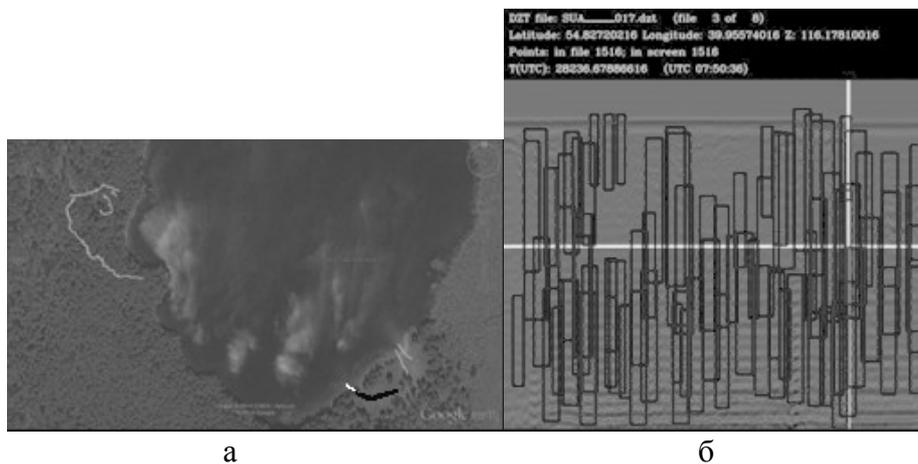


Рисунок 7а, б. Берег озера (место сырое)

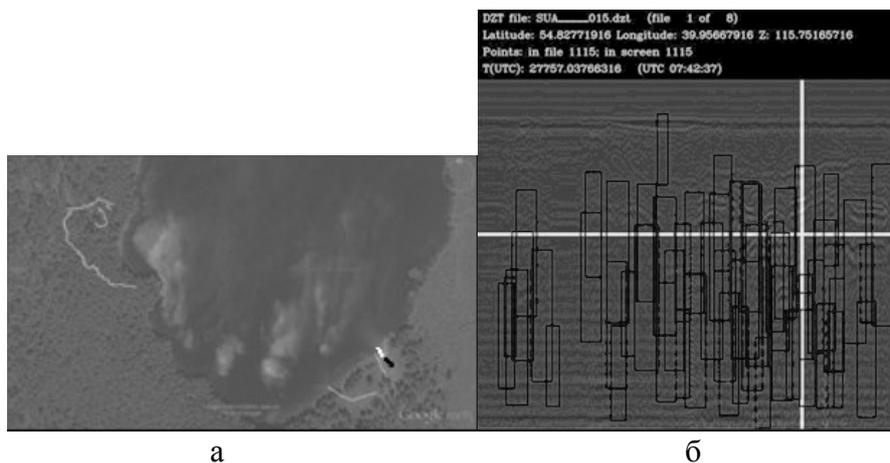


Рисунок 8а, б. Берег (грунтовые воды)

После успешной проверки работоспособности данной технологии для определения влажных участков грунта вблизи озера и холмов авторами этой статьи были созданы аналогичные базы для определения песчаного грунта, а также локализованных аномалий, несводимых к скоплениям песка и воды.

Программа, осуществляющая обработку геолокационной информации, реализована на вычислительном комплексе (ВК) «Эльбрус» [3]. Программа обеспечивает мониторинг состояния георадара, определяя факт начала работы, а после включения и использования георадара осуществляет:

- автоматический прием от георадара файла с данными радарограммы;
- выполнение нормализации расстояния между точками (во избежание горизонтальных сжатий), что позволяет выполнять сканирование с произвольной скоростью;
- применение к нормализованным точкам по горизонтали и вертикали (если вертикальная нормализация была необходима) трех каскадов Хаара на три вида объектов (влажность, песок, аномалии);
- вывод данных в файл и на экран ВК «Эльбрус-Монокуб-РС».

ВК Монокуб-РС является компактным компьютером на базе микропроцессора «Эльбрус-2С+». Время обработки данных готового трека на ВК «Монокуб-РС» не

превышает 1 с.

Технические характеристики ВК «Монокуб-РС»

Микропроцессор	«Эльбрус-2С+»
Количество процессоров	1
Количество ядер	2+4 DSP
Рабочая тактовая частота процессора, МГц	500
Кэш команд процессора, Кбайт (на ядро)	64
Кэш данных процессора, Кбайт (на ядро)	64
Кэш второго уровня процессора, Кбайт (на ядро)	1024
Пиковая производительность МП, GFlops	до 28
Оперативная память, Гбайт	4*
Дисковая память, Гбайт, не менее	500 (SATA) *
Привод CD/DVD	DVD-RW
Карта памяти CompactFlash	16 GB*
Каналы ввода/вывода	Gigabit Ethernet (1), RS-232 (1), USB 2.0 (4), VGA+DVI (2), Audio (2)

Программа была испытана в автоматическом режиме, единственным вмешательством оператора было включение и выключение радара. Испытания проводились осенью в средней полосе, за время испытаний ошибок распознавания не было.

Пример работы программы приведен на рис. 9. На заднем фоне – георадарограмма, нормированная по горизонтали и вертикали (здесь горизонтальная нормировка производилась не от JPS-приёмника, а от измерителя пройденного пути, что также позволяет позиционировать все интересные участки). Серые прямоугольники выделяют участки увлажнённости, белые – песок, черные – аномалии, т.е. локализованные

особенности, не сводимые к типичным особенностям грунта, но и не являющиеся песком либо водой.

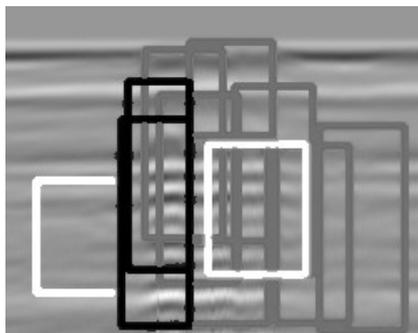


Рисунок 9. Обработанная радарограмма

Выполненная авторами работа позволяет сказать, что автоматизированные георадарные технологии анализа структуры грунта могут успешно применяться при определении несущих свойств грунта. Возможно использование георадаров для обнаружения локализованных подземных особенностей (аномалий) естественного либо искусственного происхождения. Алгоритмы обработки геолокационной информации могут быть успешно реализованы на современных отечественных ВК ряда «Эльбрус».

Заключение

В статье рассмотрен вопрос применения методов геолокации для решения задачи определения опорной проходимости. Показано, что комплексная обработка информации от нескольких источников позволяет решать задачу проходимости даже тогда, когда на маршруте не обнаруживаются явные препятствия, причем задача опорной проходимости может быть решена в интересах целой группы транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобранова В.Н. *Петрофизика: учебник для вузов по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых»*. – М.: Недра, 1986. – С. 141-185.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. *Введение в георадиолокацию*. – М.: Издательство

МГУ, 2004. – 153 с.

3. Фельдман В.М., Парамонов Н.Б. Вычислительные комплексы для решения задач обработки радиолокационной информации // Радиотехника. – 2014. – №1. – С. 43-50.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Парамонов Николай Борисович, д.т.н., проф., главный научный сотрудник, ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, (499)135-44-61, paramonov_n_b@rambler.ru.

Шишков Дмитрий Леонидович, научный сотрудник, Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9, директор по науке компании Geor.ru, (495)969-99-67, georadar@yandex.ru.

Зарипов Михаил Нилович, научный сотрудник, Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9, главный научный сотрудник компании Geor.ru, (926)597-83-49, mikezmn@mail.ru.

Егоров Геннадий Алексеевич, д.т.н., с.н.с., главный научный сотрудник, ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, (499)135-33-21, ineum@ineum.ru.