

# Обзор технических реализаций систем радиолокационного обнаружения объектов в приповерхностном слое грунта

В. Е. Туров, Е. А. Селянская, Ю. В. Киселева, А. И. Полубехин, Е. М. Ильин

Рассматриваются реализации систем радиолокационного зондирования с целью обнаружения объектов типа мина. Описаны характеристики (габаритные, электрофизические) объектов, характерные для мин и неразорвавшихся снарядов. Приведены результаты моделирования обнаружения объектов с указанными характеристиками методом георадиолокационного зондирования. Достоверное определение объекта, характеризующее вероятностью обнаружения более 0.9, достигается при глубине не более 23 см при зондировании с использованием сигналов с частотой 3 ГГц и при глубине закладки 45 см для частоты 1 ГГц. Рассмотрены известные реализации радиолокационных систем обнаружения мин. Все системы достигают вероятности обнаружения пластиковых мин 0.9 при высоком уровне ложной тревоги, которая в некоторых случаях может достигать значения 0.8.

*Ключевые слова:* подповерхностное зондирование, пластиковые объекты, вероятность обнаружения.

## 1. Введение

Наземные мины вызывают огромные гуманитарные и экономические проблемы во многих странах мира. Эксперты подсчитали, что еще до 110 миллионов противопехотных мин должны быть уничтожены. Более 20 000 гражданских лиц были убиты или искалечены противопехотными минами в мирное время [1]. Поэтому стоит задача разработать безопасную и экономически эффективную систему обнаружения мин и неразорвавшихся снарядов. За последние пятнадцать лет разработаны и исследованы различные методы обнаружения, в том числе с использованием акустических датчиков, инфракрасной техники, эффектов квадрупольного резонанса и различных типов георадаров (GPR).

Настоящая статья посвящена обзору существующих систем радиолокационного обнаружения мин. Особое внимание уделено проблеме обнаружения мин, имеющих пластиковый корпус. Такие мины, как показано ниже, встречаются с одинаковой частотой наряду с минами в металлических корпусах, но вносимые ими искажения в радиолокационное поле являются менее заметными, что в свою очередь препятствует их обнаружению.

## 2. Характеристики подповерхностных объектов

В настоящее время в открытых источниках информации описано более семисот типов мин. Для сравнительного анализа систем радиолокационного обнаружения требуется определить характеристики объектов, наиболее трудно поддающихся обнаружению. Анализ систем будем проводить применительно к их возможности обнаруживать наиболее сложный для радиолокационного зондирования тип мин. Анализ характеристик объектов проводился

с использованием базы данных «Совместное хранилище данных по боеприпасам» [2], координируемой Женевским международным центром по гуманитарному разминированию.

Все мины делятся на два типа по тактике применения: противопехотные, противотранспортные. По используемому материалу корпуса мины делятся на мины с металлическим корпусом, пластиковым корпусом и деревянным корпусом. Всего из базы данных выбрано для анализа 646 типов мин. Анализ типов мин показал, что варианты изготовления с металлическими и неметаллическими корпусами встречаются с одинаковой частотой (рис. 1а). Следует отметить, что в современных типах вооружения используются неметаллические корпуса (разные виды пластика). Наиболее часто используемым взрывчатым веществом является тротил, смеси с использованием тротила и гексогена (рис. 1б).



Рис. 1. Распределение мин по используемому материалу корпуса и взрывчатого вещества

В зависимости от тактики применения мины имеют различные массогабаритные размеры и способы установки. Мины с наименьшими габаритными размерами (от 3 до 10 см высотой) являются противопехотными и устанавливаются внаброс на поверхность с летательных аппаратов (например, вертолетов) или вручную. Остальные мины закладываются в грунт на глубину от 5 до 30 см от верхней части корпуса в зависимости от механизма используемого взрывателя.

По форме и габаритным характеристикам рассмотренные типы можно свести к одной форме – цилиндр с различными отношениями высоты ( $h$ ) и диаметра ( $d$ ). На рис. 2 представлены три обобщенных варианта соотношения диаметр/высота.

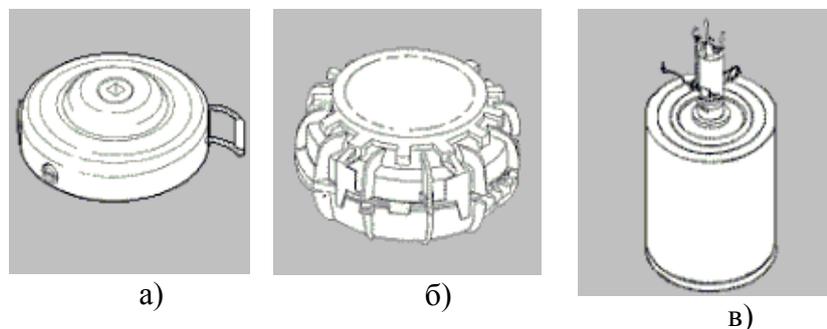


Рис. 2. Общая форма мин  
а) цилиндр  $d = 2.5h$ ; б) цилиндр  $d = h$ ; в) цилиндр  $d = 0.5h$

Наиболее часто встречающийся тип мины представлен на рис. 2а. В дальнейшем в статье под объектом локации или миной понимается мина именно этой формы.

Мины с металлическими корпусами при радиолокационном зондировании вносят значительное изменение в отраженное поле, поэтому являются наиболее легко определяемыми типами боеприпасов. Объекты с пластиковым корпусом наиболее трудно поддаются обнаружению из-за малого различия электрических параметров материала мины и окружающей среды (табл. 1).

Таблица 1. Электрические параметры веществ

| Вещество                   | Усредненные значения диэлектрических проницаемостей |
|----------------------------|---|
| <b>Материал корпуса</b>    |   |
| пластик                    | 3.3   |
| дерево                     | 2.95  |
| <b>Взрывчатое вещество</b> |   |
| тротил                     | 2.7   |
| В (композиция В)           | 2.9   |
| RDX                        | 3   |
| <b>Окружающая среда</b>    |   |
| Песок сухой                | 4   |
| Песок влажный              | 25  |
| Суглинок сухой             | 4   |
| Известняк влажный          | 8   |

Таким образом, наибольшую сложность вызывает обнаружение пластиковых мин с различными видами взрывчатых веществ в сухих грунтах (песок) ввиду их слабой контрастности с грунтом по электрическим параметрам. Кроме того, при обнаружении мин большое значение имеет способ установки, в частности глубина закладки мины, т.к. потери при распространении сигнала в почве велики: например, в суглинистой почве погонное затухание сигнала на частоте 1 ГГц может достигать 80 дБ/м [3]. Это влечет усложнение схемы обнаружения вследствие малой мощности эхо-сигнала объекта.

### 3. Результаты моделирования обнаружения мин с помощью георадара

Как показано выше, искомые объекты чаще всего представляют собой цилиндр с различными отношениями высоты к диаметру. Цилиндр имеет хорошо известные характеристики рассеяния [4], которые могут быть модифицированы в соответствии с диэлектрическими характеристиками почвы в случае моделирования закладки в грунт. Было проведено моделирование обнаружения диэлектрического цилиндра диаметром от 10 до 50 см с использованием классического локатора подповерхностного зондирования (ground penetration radar, GPR) на частотах 1 ГГц и 3 ГГц [5]. Моделировалась закладка цилиндра в грунт на глубину от 0 до 1000 мм, необходимое отношение сигнал/шум приемника – 14.6 дБ.

На графиках (рис. 3 и 4) представлены семейства кривых, отражающие зависимости вероятности обнаружения мины диаметром  $D$  от глубины закладки в грунт. Диэлектрическая проницаемость объекта –  $\epsilon_{\text{мины}} = 2.2$ , диэлектрическая проницаемость грунта –  $\epsilon_{\text{грунта}} = 9$ , погонное затухание сигнала в грунте – 27 дБ/м, высота поднятия антенны над поверхностью – 10 см. Увеличение диаметра цилиндра на графиках происходит слева направо с шагом 10 см.

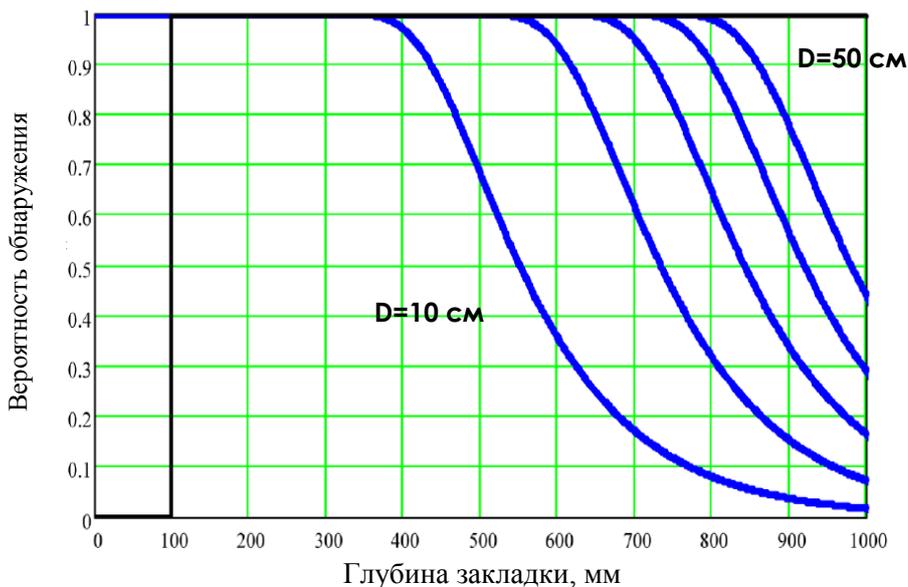


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения мины от глубины закладки для частоты зондирования 1 ГГц

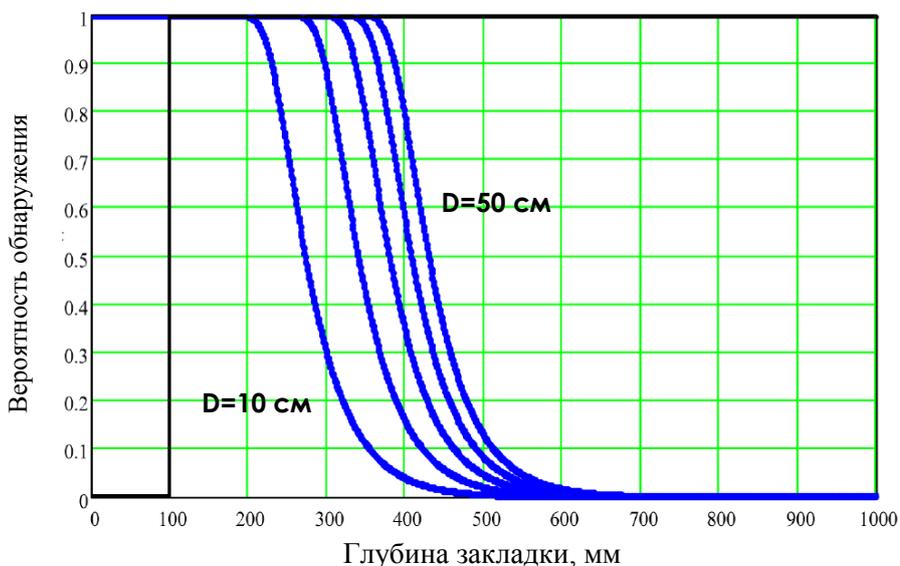


Рис. 4. Зависимость вероятности обнаружения мины от глубины закладки для частоты зондирования 3 ГГц

Из графиков видно, что достоверное определение (вероятность обнаружения превышает 0.9) описанного цилиндра достигается при глубине не более приблизительно 23 см при зондировании на 3 ГГц и при глубине закладки 45 см на частоте 1 ГГц для наименьшего диаметра цилиндра. Такие параметры глубин являются достаточными для задачи радиолокационного обнаружения мин, так как глубина их установки редко превышает 20 см.

Однако параметры модели по мощности отклика сигнала и электрическим характеристикам грунта и объекта далеки от тех, которые можно достичь в реальности, т.к. всегда присутствует эхо-сигнал поверхности, который превышает по мощности отклик от объекта.

#### 4. Реализации радиолокационных систем

В отличие от результатов моделирования в описаниях реальных экспериментов с применением существующих радиолокационных систем достигается вероятность обнаружения 0.77–0.9 при глубинах закладки менее 10 см. Так, в системе UK Minder CAP, фотография которой представлена на рис. 5, вероятность обнаружения составляет 0.77–0.8 при глубине закладки от 10 до 17 см и высоте антенной системы над землей 15 см [6].



Рис. 5. Система UK Minder CAP

На рис. 6 представлена фотография комплекса подповерхностного зондирования НИТЕК [7]. НИТЕК представляет собой сверхширокополосную систему (200 МГц – 7 ГГц) с антенной, смонтированной на передней части транспортного средства.



Рис. 6. Радиолокационная система НИТЕК

Эта система движется медленно, обнаружение объектов возможно только тогда, когда система находится непосредственно над этим объектом, что неэффективно при поиске взрывных устройств.

Антенная система состоит из 51 элемента, расположенных относительно друг друга на расстоянии 5 см. Элементы антенны излучают постоянно, тем самым образуя с приемной антенной бистатическую схему локации. Излучаемый сигнал – гауссовский импульс, принимаемый после излучения во временном окне 6.6 нс.

Система позволяет достичь вероятности обнаружения 0.95 при использовании различных алгоритмов постобработки, однако «сырые» данные дают вероятность обнаружения 0.37 [8].

На рис. 7 представлена фотография системы FLGRP, разработанной Стэнфордским Исследовательским институтом (SRI).



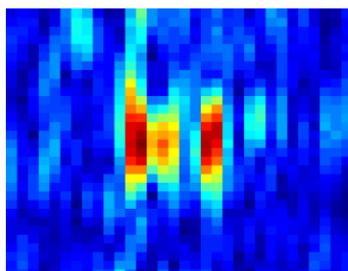
Рис. 7. Радиолокационная система FLGPR SRI

Система состоит из двух передатчиков и восемнадцати приемников, использующих четырехугольные рупорные антенны. Высота передающих антенн (два больших рупора на рис. 7) – около 3.3 м над землей, и фазовые центры антенн разнесены приблизительно на 3 м. Восемнадцать приемных антенн расположены горизонтально, расстояние между центрами соседних антенн – 17 см, нижний ряд антенн расположен на высоте 2 м от земли. Система работает на 1024 частотах, равномерно расположенных в диапазоне от 0.4425 до 3 ГГц с шагом 2.5 МГц. Два передатчика работают последовательно, все приемники работают одновременно. Таким образом, на каждый скан приходится 36 каналов. Эта система может работать в двух режимах: вертикальная поляризация передатчиков и вертикальная поляризация приемников, горизонтальная поляризация передатчиков и горизонтальная поляризация приемников. Пока автомобиль движется, происходит запись полученных сигналов, расстояние между двумя сканами – около 0.5 м. Для определения положения каждого скана используется GPS система. Область зондирования – прямоугольник 5x8 м (8 м – вдоль движения автомобиля, 5 м – перпендикулярно направлению движения).

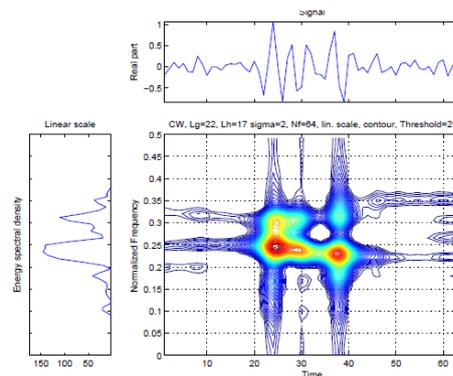
В статье [9] описывается подход к распознаванию мин (постобработке принятого сигнала), который состоит из двух этапов: распознавание сложных структур в целевом сигнале и адаптация используемого в системе классификатора к окружающей среде через обучение. Первый этап проводится с использованием частотно-временного анализа, для визуализации результатов применяют преобразования Чоя–Вильямса. После применения этого преобразования одномерный сигнал переходит в двумерный. На рис. 8 представлено изображение мины (а), радиолокационное изображение (б) и результат его частотно-временного представления с помощью преобразования Чоя–Вильямса (в).



а) объект



б) радиолокационное изображение



в) частотно-временное представление

Рис. 8. Пример обработки радиолокационного изображения, полученного системой FLGPR SRI

Для второго этапа обнаружения используется обработка полученного частотно-временного представления с помощью Вейвлет-преобразования. В описываемой статье приведены примеры распознавания только металлических объектов, зарытых в грунт на глубину до 10 см. Используемый метод обзора дает более высокую разрешающую способность по

направлению движения, чем перпендикулярно ему. Достижимая вероятность обнаружения при этом составляет 0.95.

В 2010 году опубликована разработка Департамента ночного видения и электронных датчиков Армии США [10]. Описан опыт применения СШП-радиолокатора подповерхностного зондирования (ALARIC) для определения взрывных устройств, расположенных под землей. Система использует диапазон 0.3 – 3 ГГц. В статье описан успешный опыт по распознаванию металлических целей, описание эксперимента по обнаружению неметаллических объектов не приводится.

Все описанные выше радиолокационные системы монтируются на автомобиль. Известны устройства для обнаружения мин с возможностью базирования на летательном аппарате, например, система ASTAMIDS (система обнаружения минных полей в воздухе), разработанная U.S. Army Engineer School [11]. При размещении ASTAMIDS на летательном аппарате, например, вертолете или беспилотном летательном аппарате, достигается вероятность обнаружения 0.8 для мин в грунте, 0.9 для мин, расположенных на поверхности. Данная система основана на применении сигналов инфракрасного диапазона. Система Mineseeker [12] построена на основе применения СШП-сигналов и базируется на аэростате. Дирижабль типа А60+ был оборудован сверхширокополосным радиолокатором с синтезированной апертурой (UWBSAR). Ширина полосы излучаемого сигнала достигала 3 ГГц. По мнению разработчиков, параметры радара позволяют обнаруживать мины, скрытые листвой, а также зарытые на небольшую глубину. Предварительные эксперименты показали, что разрешения данного радиолокатора достаточно для обнаружения металлических и пластиковых мин на открытой поверхности типа асфальт.

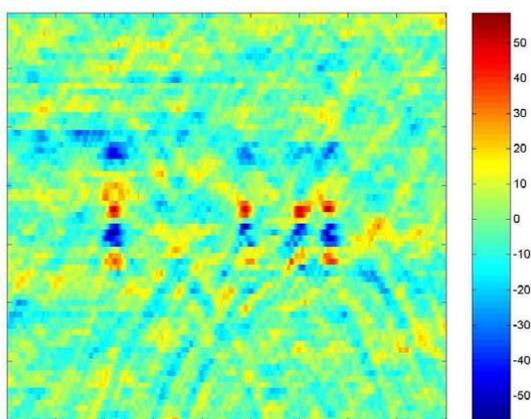


Рис. 9. Радиолокационное изображение (РСА) пластиковой мины в траве

На рис. 9 представлено изображение пластиковой мины 10 см в диаметре, скрытой за травой высотой 30 см. При высоте полета дирижабля 20 – 25 м и под углом места  $45^\circ$  обнаруживались как металлические, так и пластиковые мины. Основным недостатком радиолокационных систем воздушного базирования является высокий уровень ложных тревог, обусловленный местными отражениями от подстилающей поверхности. К их достоинствам следует отнести высокую производительность и отсутствие риска подрыва на минах для персонала при разведке местности.

## 5. Заключение

На основе анализа публикаций можно сделать вывод, что в настоящее время с использованием современных технологий и подходов возможно обнаружение подповерхностных объектов, в том числе и пластиковых мин с поднятых над землей платформ.

Общим недостатком систем является высокая вероятность ложной тревоги, которая иногда достигает 0.8 при обнаружении пластиковых мин. При вероятности ложной тревоги равной 0.91 во всех методах происходит обнаружение мин с вероятностью 1. При вероятности ложной тревоги равной 0 вероятность обнаружения падает до 0.3 – 0.6 в зависимости от метода и исследуемой территории (в лесистых местностях и при наличии высокой травы ниже, чем в песчаной и сухой местности).

Кроме того, все рассмотренные методы требуют длительной постобработки данных, что затрудняет их применение в условиях ограниченного времени принятия решения.

Таким образом, задача распознавания пластиковых объектов с летательных аппаратов с возможностью быстрой обработки данных и принятия решений при высокой вероятности обнаружения на сегодняшний день остается актуальной.

## Литература

1. Adopt-a-minefield [Электронный ресурс]. URL: <http://www.landmine.org> (дата обращения: 29.07.2015).
2. Совместное хранилище данных по боеприпасам [Электронный ресурс]. URL: <http://cord.gichd.org> (дата обращения: 29.07.2015).
3. *Ефимов А. В.* Проблемы сверхширокополосного подповерхностного зондирования // Материалы VII Всероссийской научной конференции «VI Всероссийские Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 31 мая-02 июня, 2016. Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 451–461.
4. *Skolnik M.* Radar Handbook, 2nd Edition, ISBN 007057913X, McGraw-Hill, New York, 2008. 1352 p.
5. Unexploded Ordnance Detection and Mitigation / Edited by Jim Byrnes / Springer, 2009. 286 p.
6. *David J. Daniels.* Ground Penetrating Radar for Buried Landmine and IED Detection // Springer, 2009. P. 89–111.
7. НИТЕК [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niitek.com> (дата обращения 29.07.2015).
8. *Christopher R. Ratto, Peter A. Torriane and Leslie M. Collins.* Exploiting Ground-Penetrating Radar Phenomenology in a Context-Dependent Framework for Landmine Detection and Discrimination // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49, № 5. P. 1689–1700.
9. *Yijun Sun and Jian Li* Adaptive. Learning Approach to Landmine Detection // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 2005. V. 41, № 3. P 541–549.
10. *Wong, D., Tuan Ton and M. Soumekh.* ALARIC Forward-Looking Ground Penetrating Radar System with Standoff Capability // 2010 IEEE National Conference on Wireless Information Technology and Systems, 2010. P. 1.
11. *David Kerner, John Deni, Joseph Grubb, Churchill Hutton, Richard Johnson and Thomas Kincaid.* Anti-Personnel Landmine (APL) Detection Technology Survey and Assessment - Wide-Area Detection in Support of Arms Control // Technical report, DynMeridian, March, 1999. P. 643–647.
12. MineseekerFoundation. KOSOVO TRIALS REPORT. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mineseeker.org> (дата обращения 27.08.2015).

Статья поступила в редакцию 15.04.2016

### Туров Виктор Евгеньевич

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150050, Ярославль, ул. Яковлевская, д. 14, кв. 20), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: victorturov@gmail.com.

**Селянская Екатерина Андреевна**

инженер 1 категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150064, Ярославль, ул. Строителей, д. 5, корп. 4, кв. 136), тел. (4852) 79-77-29, e-mail: eselyanskaya@mail.ru.

**Киселева Юлия Владимировна**

инженер 1 категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150010, Ярославль, ул. Пирогова, д. 33, корп. 2, кв. 58), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: kiselii@bk.ru.

**Полубехин Александр Иванович**

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-925-821-06-31, e-mail: polub1980@mail.ru.

**Ильин Евгений Михайлович**

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик МГТУ им. Н. Э. Баумана (105077, Москва, ул. Средняя Первомайская, д. 17, кв. 45), тел. (499) 263-6846, e-mail: evgil45@mail.ru.

**Overview of the technical implementation of radar detection systems of objects in the soil surface layer**

**Victor E. Turov, Catherine A. Selianskaia, Julia V. Kiseleva, Alexander I. Polubekhin, Eugene M. P'yin**

The overview considers methods of subsurface radar sensing to detect buried plastic landmines. The most common types of mines and their electrical parameters are presented. All systems achieve the probability of detecting plastic mines 0.9 with a high level of false alarm rate.

*Keywords:* radar sensing, plastic objects, probability of detection, UWB signal.