

Широкозахватная радиотехническая система обнаружения мин (Radio Frequency Countermine System with Broad Size Detector)

И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.Н. Саблин
I.A. Vasilyev, S.I. Ivashov, V.N. Sablin

Рассмотрена возможность повышения эффективности работ по разминированию за счёт использования широкозахватных средств и получения радиоизображения местности в полосе движения датчиков миноискателя. Создан экспериментальный стенд и предложены пространственные алгоритмы обнаружения мин и селекции ложных тревог. Предлагаемые методы могут найти применение при проведении миротворческих и гуманитарных операций.

In this paper is considering a new method of minefield reconnaissance with use of the broad size detector. The method allows getting the terrain's radio images in the band of the mine detector sensors. The experimental installation was created with set of radio ground probing sensors. To treat the radio images and to reduce the number of false alarms the spatial algorithms was proposed. The mine detector of this kind can be used in peacekeeping and humanitarian operations.

Введение. Для современных локальных войн и конфликтов характерно массированное применение противопехотных и противотанковых мин. При этом карты минных полей, как правило, либо отсутствуют, либо недоступны стороне, выполняющей работы по разминированию. Наличие таких минных полей приводит к значительным жертвам среди мирного населения.

Работы по разминированию, выполняемые с помощью современных методов, требуют значительных средств и времени и часто приводят к потерям среди сапёров. В связи с этим возникает необходимость значительно повысить производительность работ по разминированию при повышении качества этих работ (снижении уровня ложных тревог и увеличении вероятности обнаружения мин).

Существующие системы обнаружения установленных в грунт «малозаметных» мин в пластмассовых корпусах, как правило, используют радиотехнические датчики. Принцип обнаружения в этих системах связан с измерением изменения диэлектрических свойств грунта в месте установки мины. Учитывая малый контраст мины, при достаточном уровне обнаружения вероятность ложных тревог на единицу исследуемой площади оказывается неприемлемо высокой. Это связано в первую очередь с отражениями радиосигналов от естественных неоднородностей в грунте и его поверхности. Указанный недостаток обусловлен низкой информативностью традиционных миноискателей, производящих идентификацию мины используя только амплитуду отраженного от нее сигнала.

Одним из способов преодоления возникающих трудностей является использование широкозахватных систем обнаружения мин. Преимуществами широкозахватных систем являются их более высокая производительность и, как будет показано ниже, возможность за счёт пространственной селекции повысить информативность обнаружения мин и, как следствие этого, снизить вероятность ложных тревог при разминировании.

Аналогичные задачи возникают в подповерхностной локации при обнаружении в грунте протяжённых объектов: кабелей, труб, остатков старых фундаментов и т.д. В результате переноса результатов зондирования в план съёмки по форме контура объекта можно сделать достаточно правдоподобные предположения о его типе. Отражения от подземных объектов в этом случае представляют собой коррелированные последовательности отметок, общие контуры которых хорошо распознаются даже при высоком уровне фоновых отражений. Также и при обнаружении мин установленных в грунт, зная характерный размер противотанковой мины - 20÷30 см, можно выделять мины на фоне местных неоднородностей грунта по их форме и размерам.

Описание экспериментального макета. Для проверки возможности повышения качества работ по разминированию был создан макет широкозахватного миноискателя с датчиками радиоволнового типа. Радиоволновые датчики работали на монохроматическом сигнале с частотой 600 МГц и представляли собой поисковый элемент стандартного армейского миноискателя. Датчики данного типа являются одной из разновидностей подповерхностного радиолокатора [1,2] и предназначены для обнаружения объектов в приповерхностном слое почвы.

Экспериментальный макет состоял из ряда миноискателей собранных в линейку и механического устройства, которое обеспечивало передвижение миноискателя над поверхностью грунта*. Общий вид макета миноискателя представлен на рис. 1.

Передвижение макета широкозахватного миноискателя осуществлялось над поверхностью грунтового полигона с размерами 2×6 м в плане съёмки и глубиной 1,5 м. Сигналы датчиков миноискателя через интерфейс подавались в ЭВМ для дальнейшей обработки.

Формирование радиоизображения. Изображение исследуемой поверхности грунта формировалась следующим образом. Каждому уровню сигнала с приёмников датчиков миноискателя ставился в соответствие определённый уровень плотности отметок на изображении. При этом каждый датчик формировал одну строку изображения в полосе движения макета широкозахватного миноискателя. Складывая полученные строки последовательно в порядке следования датчиков широкозахватного миноискателя, получали двухмерное радиоизображение, т.е. i -му датчику соответствовала i -я строка изображения. Сами сигналы датчиков являются аналоговыми функциями времени и для обработки на ЭВМ требуют дискретизации. Поставим в соответствие среднему уровню сигнала i -го датчика во временном интервале от t_k до $t_k + \Delta t$ значение

$$m_{i,k} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} g_i(\tau) \cdot d\tau \quad , \quad (1)$$

где $m_{i,k}$ – значение плотности яркости k -го элемента строки изображения, получаемого i -м датчиком;
 g_i – сигнал с i -го датчика широкозахватного миноискателя;
 τ – параметр интегрирования;
 Δt – интервал дискретизации по времени.

* Авторы работы выражают благодарность А.А.Дмитриенкову, В.В.Полякову и Ю.Н.Ходячих за помощь в организации и проведении экспериментальных работ.

При этом

$$t_k = (k-1) \cdot \Delta t, \quad k=1,2,3,\dots,K; \quad (2)$$

где K – общее число элементов в строке изображения.

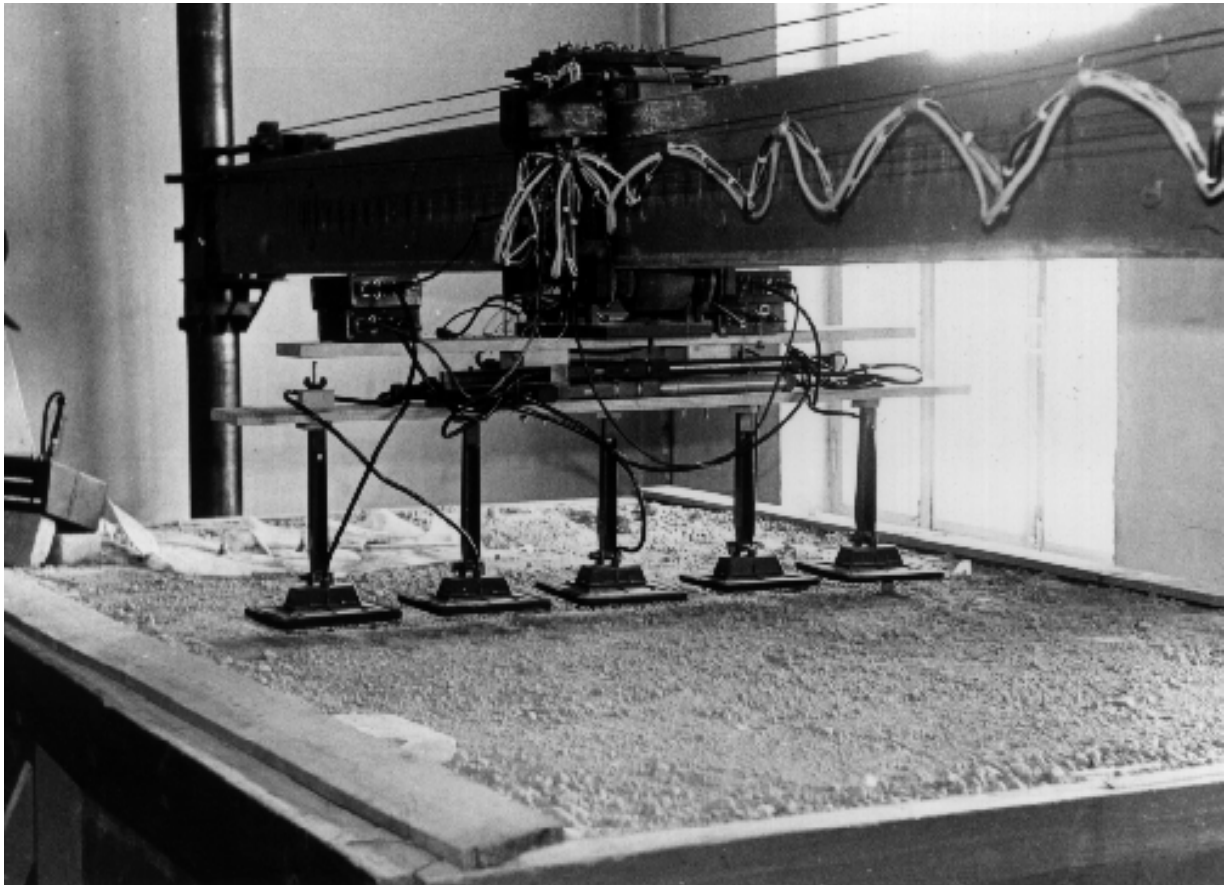


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда.

Пусть общее число датчиков равно I . Тогда в результате указанного выше преобразования получим дискретное полутоновое изображение, содержащее I строк и K столбцов, элементы которого $m_{i,k}$ образуют матрицу $M = \|m_{i,k}\|$, $i = 1,2,3,\dots,I$; $k = 1,2,3,\dots,K$.

Представим некоторые экспериментальные результаты. На рис. 2 приведено радиоизображение противотанковой мины в пластмассовом корпусе в грунте. На другом изображении, рис. 3, в его центре находятся две мины, одна из которых в металлическом корпусе (слева), а другая в пластмассовом. В левом нижнем угле данного рисунка приведено изображение отрезка металлической трубы, в правом нижнем угле – металлической пластины размером $30 \times 30 \text{ см}^2$ и в верхнем правом углу – кирпича. Все эти объекты заглублены в грунт на глубину от 5 до 10 см. На приведенных изображениях шаг дискретизации вдоль направления движения равен 10 см, а по поперечной оси - 15 см.

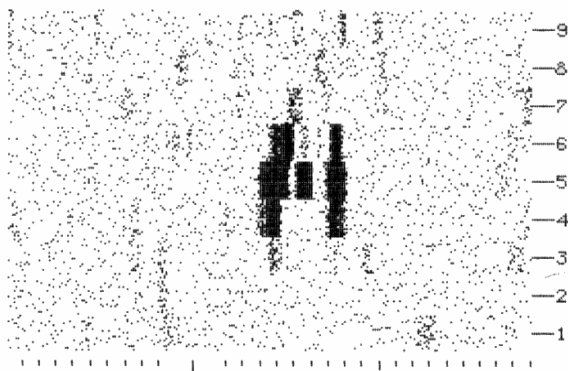


Рис. 2. Радиоизображение противотанковой мины в пластмассовом корпусе в грунте.

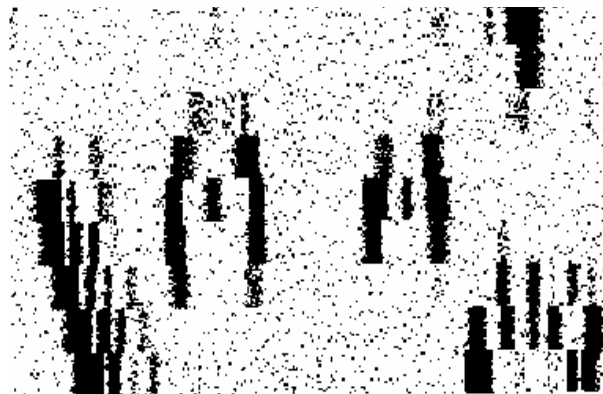


Рис. 3. Радиоизображение противотанковых мин и различных объектов в грунте.

В качестве мины в металлическом корпусе использовалась противотанковая мина типа ТМ-62М, а противотанковая мина типа ТS-6 использовалась в качестве мины с пластмассовым корпусом. Изображения этих мин представлены на рис. 4 и 5. Размер диаметра обеих этих мин в плане составлял около 25 см.



Рис. 4. Противотанковая мина в металлическом корпусе типа ТМ-62М.

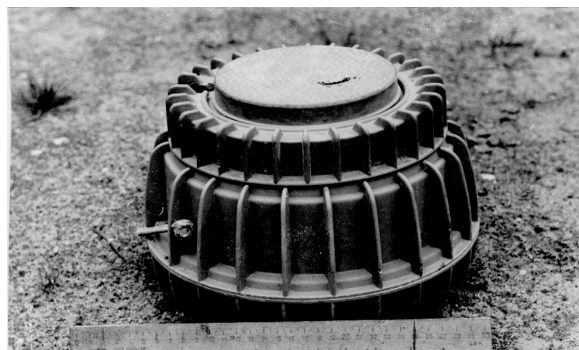


Рис. 5. Противотанковая мина в пластмассовом корпусе типа ТS-6.

Анализ радиоизображений на рис. 2 и 3 показывает, что изображение мины представляет собой две дуги перпендикулярные к направлению движения датчиков и тёмную метку между ними. Характерный размер получаемых изображений мин близок к размеру мины в плане, т.е. 20÷30 см. Отметим также, что форма получаемого изображения определяется как размерами самой мины, так и конструкцией радиоволновых датчиков широкозахватного миноискателя. Дальнейшие эксперименты показали, что подобное изображение мины достаточно устойчиво к местным неоднородностям грунта.

Алгоритм фильтрации. Учитывая данное обстоятельство, достаточно эффективным оказался алгоритм пространственной фильтрации, «распознающий» мины в грунте по размерам и характерной форме их радиоизображений. Для распознавания используем корреляционный фильтр с матрицей распознавания, которая зависит от формы и размеров объектов

поиска. Для идентификации мины была выбрана матрица \mathbf{F} , соответствующая изображению состоящему из двух дуг и центрального пятна. Значения элементов матрицы и её размерность выбирались эмпирически на основе совокупности экспериментальных данных:

$$\mathbf{F}_{j,n} = \|f_{j,n}\| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad \begin{matrix} j = 1,2,3; \\ n = 1,2,\dots,12. \end{matrix} \quad (3)$$

Указанная матрица распознавания (3) последовательно накладывалась на радиоизображение исследуемого участка, при этом она перемещалась на один шаг дискретизации по строкам и столбцам соответственно.

Данная процедура пороговой фильтрации реализовывалась следующим эмпирическим корреляционным алгоритмом. Каждому элементу матрицы яркости исходного радиоизображения $\|m_{i,k}\|$ ставился в соответствие элемент матрицы изображения $\|l_{i,k}\|$, который вычислялся следующим образом

$$l_{i,k} = \Theta \left(\sum_{j=1}^3 \sum_{n=1}^{12} f_{j,n} \cdot m_{i+j-2, k+n-5} - p \right), \quad (4)$$

где p – значение порога, которое определяется требуемой вероятностью обнаружения мины.

Физический смысл преобразования (4) состоит в следующем. Если в окне фильтра \mathbf{F} , оказывается объект по форме близкой к той, которую определяют единичные элементы матрицы (3) и это совпадение достаточно велико на столько, что значение суммы в (4) превышает пороговое значение p , то элемент отфильтрованного изображения $l_{i,k}$ равен единице, в противном случае нулю. Значение порога p определяется опытным путём в соответствии с величиной контраста мин и степенью неоднородности почвы.

В выражении (4) функция $\Theta(x)$ задана следующим образом:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1; & \text{при } x > 0. \\ 0; & \text{при } x \leq 0. \end{cases},$$

где x – аргумент функции Θ .

Отметим также, что вычисляемые значения индексов матрицы $\mathbf{M} = \|m_{i,k}\|$ в соотношении (4) могут выходить за границы области её определения. В этом случае соответствующие значения матрицы полагались равными нулю. В результате преобразования (4) из исходного полутонового радиоизображения, задаваемого матрицей \mathbf{M} , получается бинарное изображение. Рассмотрим пример фильтрации радиоизображения, полученного на описанном выше экспериментальном стенде.

Обработка экспериментальных результатов. Для определения эффективности выделения мин на фоне неоднородностей грунта создавалась фоноцелевая обстановка, соответствующая реальным условиям. С этой целью на поверхности грунта экспериментального стенда выкапывались углубления и насыпались бугры, а также были закопаны кирпич, отрезок металлической трубы и металлическая пластина. На небольшой глубине 5÷7 см в грунте бы-

ли закопаны три противотанковых мины, одна из которых была с металлическим корпусом, рис. 4, а две других имели пластмассовые корпуса, рис. 5. В результате съёмки поверхности экспериментального стенда было получено изображение, приведённое на рис. 6.

Результат фильтрации этого радиоизображения с помощью описанного выше алгоритма (4) приведён на рис. 7. Из данного рисунка видно, что обнаружены все три мины. В то же время объекты линейной формы и случайные неоднородности фона полностью отфильтрованы и исчезли с изображения. В реальной обстановке результат фильтрации может оцениваться как человеком-оператором, так и в автоматическом режиме. Последний режим реализуется достаточно просто, так как элементы полученного изображения, которые соответствуют предполагаемому расположению мин равны единице, а остальные нулю.



Рис. 6. Исходное радиоизображение
грунтового полигона с минами
и другими объектами.

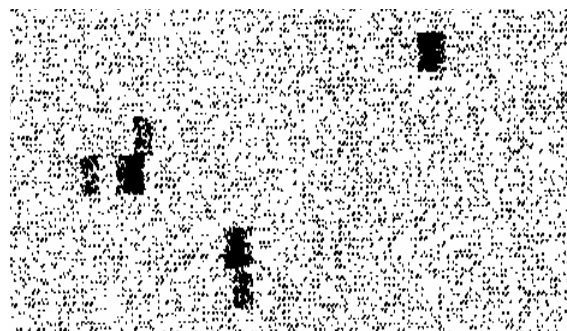


Рис. 7. Результат фильтрации
радиоизображения на рис. 6.

В заключение отметим, что предлагаемая технология может оказаться весьма эффективной при использовании её в операциях по разминированию и ликвидации последствий локальных конфликтов. В этом случае предлагаемый широкозахватный датчик мог бы устанавливаться на дистанционно управляемом подвижном шасси, а получаемые датчиками сигналы передавались бы по радиоканалу и обрабатывались на пункте управления, размещаемого вне минного поля. Для улучшения показателей обнаружения рассмотренный выше широкозахватный миноискатель на основе радиоволновых датчиков мог бы быть дополнен феррозондами [2] или другими средствами обнаружения мин. В этом случае для улучшения параметров обнаружения могла бы использоваться схема совпадений в нескольких каналах миноискателя.

Литература

1. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н.; Под ред. Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1994.
2. Bruschini C., Gros B., Guerne F., Piece P.Y., Carmona O. Ground Penetrating Radar and Induction Coil Sensor Imaging for Antipersonnel Mines Detection. 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. GPR'96 Tohoku University Faculty of Engineering, Sendai, Japan. 30 sep.-3 oct., 1996. pp. 211-216.