

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бражников Н.И. Ультразвуковая фазометрия. – Москва: «Енергія», 1968, с. 174 – 180.
2. Глебов В.С., Пожежна безпека нафтобаз і об'єктів магістральних трубопроводів. – М.: Надра, 1972. –376 с.
3. Іванов Е.Н. Автоматичні засоби виявлення і гасіння пожеж. – М.: Стройиздат, 1976. –412 с.
4. Волков О.М. Пожежна безпека резервуарів з нафтопродуктами. –М.: Надра, 1984. –152 с.

**УДК 621.397:681.32**

*Залевский Г.С., канд. техн. наук, доц., ХУВС,  
Фещенко А.Б., канд. техн. наук, ст. преп., УГЗУ,  
Фещенко К.Б., инженер ЧП «АСТЕК»,  
Щербак Г.В., канд. техн. наук, нач. каф., УГЗУ*

### **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ**

(представлено д-ром техн. наук Соловьев В.В.)

Показано, что при решении задачи поиска установленных в грунте взрывоопасных предметов целесообразно применять радиолокационное подповерхностное зондирование сверхширокополосными сигналами. Обоснована необходимость частотной фильтровой обработки сигналов в радиолокаторе подповерхностного зондирования при обнаружении взрывоопасных предметов. Проведен синтез частотной характеристики корректирующего фильтра в условиях искажающего влияния дисперсного характера распространения радиоволн в грунте на спектр зондирующего сигнала

**Постановка проблемы.** В настоящее время перед аварийно-спасательными подразделениями МЧС Украины поставлена задача обнаружения и обезвреживания различных взрывоопасных предметов (ВП): снарядов, мин, ракет, скоплений нефтепродуктов

или отравляющих веществ, залегающих в подповерхностном слое грунта и несущих угрозу жизни населения и экологической безопасности страны.

Задача осложняется тем, что многие современные ВП содержат минимальную долю металлических элементов (например, пластиковые или бескорпусные мины), обнаружение которых традиционными способами затруднено. При их поиске и обезвреживании, к сожалению, происходит 1-2 случая гибели саперов на каждую тысячу удаленных мин. От взрывов страдают не только работники МЧС, но и гражданское население [1].

Традиционно применяемые для обнаружения и распознавания ВП специально обученные собаки, детекторы металлических предметов индукционного типа, ультразвуковые металлоискатели, инфракрасные и тепловые нейтронные детекторы, детекторы, использующие ядерный квадрупольный резонанс, нейтронные и гамма датчики не обеспечивают необходимую условную вероятность правильного обнаружения и имеют высокий уровень ложных тревог. По требованиям ООН условная вероятность правильного обнаружения мин техническими средствами должна составлять более 99,6 %, при этом в инженерных подразделениях Армии США принята допустимая норма — одно ложное обнаружение на каждые 1,25 м<sup>2</sup>[2].

Интересным решением при разработке новых активных электромагнитных средств обнаружения малоразмерных ВП в полупроводящих средах является так называемый «информационно-силовой» подход [3]. Он заключается в применении сверхширокополосных зондирующих сигналов с последующей статистической обработкой принимаемой информации на основе встроенного спецвычислителя. Опытные образцы подобной радиолокационной техники успешно используются в строительстве и гидрологии. С их помощью возможно обнаруживать в грунте тайники, инженерные мины, металлические и пластмассовые трубы, пустоты на глубинах до нескольких метров с пространственным разрешением  $\pm 0,3...0,5$  м. При этом скорость поиска составляет 0,5...1 км/ч, а полоса обнаружения — 0,5...1 м.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Целесообразность и эффективность применения методов радиолокационного зондирования для обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов обусловлена прежде всего возможностью РЛС дистанционно обнаруживать и распознавать объекты независимо

от метеоусловий и естественной освещенности Земли. Кроме того, СВЧ-зондирующие электромагнитные поля (в диапазоне частот от 0,05 до 2 ГГц и более) обладают проникающей способностью через укрывающие полупроводящие среды (грунт, растительность, снег, воду), под которыми могут находиться объекты поиска.

В работах [3, 4] дана оценка возможностей магнитометрического, индукционного и радиолокационного методов зондирования укрывающих сред для поиска малоразмерных рукотворных объектов глубинного заложения применительно к сферам строительства и эксплуатации подземных коммуникаций, борьбы с терроризмом, гуманитарного разминирования, археологии и др.

Вместе с тем, обнаружение и идентификация ВП радиолокаторами подповерхностного зондирования сопряжены с рядом трудностей, таких как: наличие наряду с сигналом, отраженным от ВП, мощного отклика от границы раздела сред; суточные, сезонные и погодные колебания физических характеристик неоднородных, поглощающих и дисперсных сред, окружающих ВП; присутствие посторонних предметов (камни, кирпичи, остатки труб и др. искусственные объекты), приводящих к повышению условных вероятностей принятия ложных решений; малая различимость диэлектрических проницаемостей ВП и среды распространения радиоволн (например, обнаружить пластиковую мину гораздо сложнее, чем металлическую).

Так как для обнаружения, распознавания и измерения глубин залегания малоразмерных ВП используется отраженный сигнал, для этого радиолокатор подповерхностного зондирования должен иметь высокое разрешение по дальности, что достигается применением сверхширокополосных сигналов. Однако, дисперсный характер прохождения сигнала в грунте, как в среде распространения радиоволн, приводит к нелинейной зависимости поглощения компонент спектра радиоизлучения сверхширокополосного сигнала от глубины залегания ВП. Кроме того, дисперсный характер распространения сигнала вносит различное время запаздывания (набег фазы) для каждой гармоники спектра сверхширокополосного сигнала, что существенно искажает спектральную структуру отраженного сигнала и его функцию модуляции по сравнению с исходной при зондировании [5].

Вышеуказанные факторы оказывают существенное негативное влияние на показатели обнаружения и распознавания малоразмерных ВП, ухудшают разрешающую способность радиолока-

ционной системы подповерхностного зондирования по дальности и, соответственно, точность измерения глубин залегания ВП.

**Постановка задачи и её решение.** Рассмотрим алгоритм обработки принятого сигнала радиолокационной системы подповерхностного зондирования  $a_{sn}(t)$  в присутствии помехи  $n(t)$  и в условиях искажающего влияния дисперсной среды распространения радиоволн на частотно-временную структуру комплексной модулирующей функции зондирующего сигнала  $a(t)$ . Запишем отраженный сигнал в виде интеграла свертки от модулирующей функции зондирующего сигнала  $a(t)$  и априорно известной передаточной функции среды  $h_s(t,\tau)$

$$a_{sn}(t) = a_s(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $a_s(t) = \int_0^T a(\tau)h_s(t,\tau)d\tau$  – сигнальная компонента принятого сигнала;  $T$  – интервал времени наблюдения сигнала.

Оптимальной будем считать фильтровую обработку сигнала корректирующим линейным фильтром с характеристикой  $h_F(t,u)$  (рис. 1), при которой точно восстанавливается модулирующая функция зондирующего сигнала в виде оценки  $\hat{a}(t)$ .

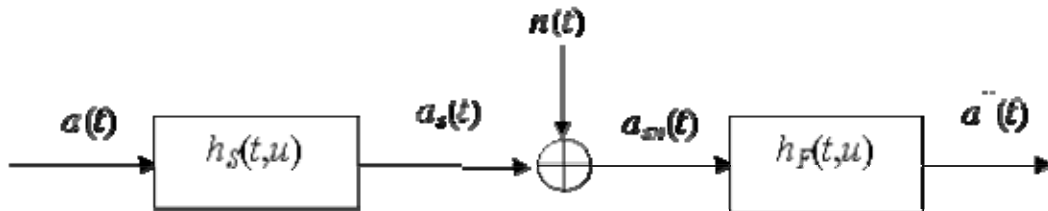


Рис. 1

Принятый сигнал  $a_{sn}(t)$  является выборочной функцией случайного процесса с нулевым средним, конечным среднеквадратическим значением, ковариационной функцией  $K_s(t,\tau)$  и наблюдается на фоне некоррелированной аддитивной помехи  $n(t)$  с нулевым средним значением и ковариационной функцией  $K_n(t,\tau)$ .

Для нахождения переходной характеристики корректирующего фильтра  $h_F(t,\tau)$  применим классический подход теории ли-

нейных фильтров с переменными во времени параметрами и простыми методами минимизации [6, 7].

Определим выражение для оценки  $\hat{\alpha}(t)$  в следующем виде (рис. 1):

$$\hat{\alpha}(t) = \int_0^T a_{sn}(u) h_F(t, u) du. \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) для принятого сигнала  $a_{sn}(t)$  в (2), выражение для оценки  $\hat{\alpha}(t)$  преобразуется к виду

$$\hat{\alpha}(t) = \int_0^T [a_s(u) + n(u)] h_F(t, u) du. \quad (3)$$

Выберем  $h_F(t, u)$  так, чтобы минимизировать ошибку точечной оценки:

$$\sigma(t) = \min\{ \langle |a(t) - \hat{\alpha}(t)|^2 \rangle \}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (1) в (4) получим:

$$\begin{aligned} \sigma(t) = |a(t) - \hat{\alpha}(t)|^2 &= |a(t)|^2 - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left\langle a(t) \hat{\alpha}(t) \right\rangle \right\} + \\ &+ \left\langle \hat{\alpha}(t) \hat{\alpha}(t) \right\rangle = |a(t)|^2 - \\ &- 2 \operatorname{Re} \left\{ \left\langle a(t) \int_0^T a_{sn}(u) h_F(t, u) du \right\rangle \right\} + \\ &+ \int_0^T \int_0^T \left\langle a_{sn}(u) a_{sn}(v) \right\rangle h_F(t, u) h_F(t, v) dudv. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате преобразований получим выражение точечной ошибки  $\sigma(t)$  в виде:

$$\sigma(t) = I_0(t) - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left\langle a(t) \int_0^T h_F^*(t, u) [a_s^*(u) + n^*(u)] du \right\rangle + \right. \\ \left. + \int_0^T \int_0^T \left[ [a_s(u) + n(u)] [a_0^*(v) + n^*(v)] \right] h_F(t, u) h_F^*(t, v) dudv, \right. \quad (6)$$

где  $I_0(t)$  – амплитуда интенсивности зондирующего сигнала.

Выполним операцию усреднения в выражении (6). Тогда, при допущении, что шумовая компонента является белым шумом, т.е. не коррелирована с сигнальной компонентой, можно обнулить ковариационные составляющие в выражении (6):

$$\sigma(t) = I_0(t) - \\ - 2 \operatorname{Re} \left\{ \int_0^T h_F^*(t, u) \int_0^T h_s^*(t, v) K_a(u, v) dv \right\} + \quad (8) \\ \int_0^T \int_0^T [K_s(u, v) + K_n(u, v)] h_F(t, u) h_F^*(t, v) dudv, \quad ,$$

где  $K_a(u, v) = \langle a(u) a^*(v) \rangle$  — автокорреляционная функция (АКФ) зондирующего сигнала;  $K_s(u, v) = \langle a_s(u) a_s^*(v) \rangle$  – АКФ сигнальной компоненты принятого сигнала, прошедшего через среду распространения (грунт);  $K_n(u, v) = \langle n(u) n^*(v) \rangle = N_0/2 \delta(u-v)$  – АКФ аддитивного дельта-коррелированного шума.

Обозначим импульсный отклик оптимального корректирующего фильтра,  $h_0(t, u)$ , а импульсный отклик любого другого фильтра в разрешенном классе  $h_F(t, u)$  в виде выражения

$$h_F(t, u) = h_0(t, u) + \varepsilon h_\varepsilon(t, u) \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  – действительный параметр;  $h_\varepsilon(t, u)$  – характеристика пространственного фильтра в разрешенном классе. В результате подстановки (9) в выражение (8) получим следующий вид выражения для точечной ошибки фильтра

$$\sigma_{\varepsilon}(t) = I_0(t) - 2 \operatorname{Re} \left\{ \int_0^T \left[ h_0^*(t,u) + \varepsilon h_{\varepsilon}^*(t,u) \right] \int_0^T h_F^*(t,v) K_a(u,v) dudv \right\} + \int_0^T \int_0^T \left[ K_s(u,v) + K_n(u,v) \right] \left[ h_0(t,u) + \varepsilon h_{\varepsilon}(t,u) \right] \left[ h_0^*(t,v) + \varepsilon h_{\varepsilon}^*(t,v) \right] dudv \quad (10)$$

Производя преобразования выражения (10) по методике, изложенной в [6, 7], получим следующее равенство для нахождения импульсного отклика оптимального корректирующего фильтра  $h_0(t,u)$  радиолокационной системы подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов

$$\int_0^T h_{\varepsilon}^*(t,u) \int_0^T h_s^*(t,v) K_a(u,v) dudv = \int_0^T h_{\varepsilon}^*(t,u) \int_0^T \left[ K_s(u,v) + K_n(u,v) \right] h_0(t,v) dudv. \quad (11)$$

Преобразуем левую и правую часть равенства (11) по Фурье, принимая во внимание, что Фурье-преобразование от свертки двух функций равно произведению их спектров, что Фурье-образом автокорреляционной функции сигнала есть энергетический спектр сигнала, а также условившись, что шум дельта-коррелирован и, следовательно, имеет равномерное распределение энергетического спектра со спектральной плотностью мощности  $N_0/2$ , получим следующую запись выражения в частотной области

$$H_{\varepsilon}^*(\omega) H_s^*(\omega) G_a(\omega) = H_{\varepsilon}^*(\omega) H_0(\omega) \left[ G_s(\omega) + \frac{N_0}{2} \right], \quad (12)$$

где  $G_a(\omega)$  – энергетический спектр АКФ зондирующего сигнала;  $H_s^*(\omega)$  – комплексно-сопряженная спектральная характеристика среды распространения радиоволн (грунт);  $G_s(\omega)$  – энергетический спектр АКФ сигнальной компоненты принятого сигнала, прошедшего слой грунта;  $N_0/2$  – спектральная плотность мощности шума;  $H_0(\omega)$ ,  $H_{\varepsilon}^*(\omega)$  – соответственно частотные характеристики корректирующего фильтра  $h_0(t,u)$  и фильтра  $h_{\varepsilon}^*(t,u)$ .

Производя несложные преобразования, получим следующее выражение для частотной характеристики корректирующего фильтра радиолокационной системы подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов

$$H_0(\omega) = \frac{H_s^*(\omega)G_a(\omega)}{G_s(\omega) + \frac{N_0}{2}}. \quad (13)$$

Для преобразования выражения (13) учтем, что АКФ принятого сигнала однозначно связана с АКФ зондирующего сигнала интегральным преобразованием, которое с учетом (1) и (8) принимает форму

$$\begin{aligned} K_S(u, v) &= \langle a_s(u)a_s^*(v) \rangle = h_s(t, u) \otimes [h_s(t, v) \otimes K_a(u, v)] = \\ &= \int_0^T h_s(t, u) \int_0^T h_s^*(t, v) K_a(u, v) dudv. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда энергетический спектр АКФ принятого сигнала  $G_S(\omega)$  при преобразовании левой и правой части равенства (14) по Фурье будет выражен через произведение спектра АКФ зондирующего сигнала  $G_s(\omega)$  спектральной характеристики среды  $H_s(\omega)$  по формуле

$$G_S(\omega) = H_S(\omega)H_S^*(\omega)G_a(\omega) = |H_S(\omega)|^2 G_a(\omega). \quad (15)$$

После подстановки (15) в (13) получим окончательное выражение для частотной характеристики корректирующего фильтра радиолокационной системы подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов

$$\begin{aligned} H_0(\omega) &= \frac{H_s^*(\omega)G_a(\omega)}{|H_s(\omega)|^2 G_a(\omega) + \frac{N_0}{2}} = \frac{H_s^*(\omega)}{|H_s(\omega)|^2 + \frac{N_0}{2G_a(\omega)}} = \\ &= \frac{1}{H_s(\omega)} \left[ 1 + \frac{N_0}{2|H_s(\omega)|^2 G_a(\omega)} \right]^{-1} = H_s^{-1}(\omega)\beta(\omega), \end{aligned} \quad (16)$$



$$\text{где } \beta(\omega) = \left[ 1 + \frac{N_0}{2|H_s(\omega)|^2 G_a(\omega)} \right]^{-1} = \left[ 1 + \frac{N_0}{2G_S(\omega)} \right]^{-1} = \left[ 1 + \frac{1}{g(\omega)} \right]^{-1} -$$

весовой спектральный множитель, зависящий от величины  $g(\omega)=2G_S(\omega)/N_0$ , характеризующей отношение сигнал-шум для фиксированной гармонической составляющей спектра принятого сигнала радиолокационной системой подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов.

**Выводы.** Анализ полученного выражения для частотной характеристики корректирующего фильтра радиолокационной системы подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов показывает, что для коррекции искажений спектра принятого сигнала, возникающих при прохождении среды с дисперсным характером распространения радиоволн (грунта), необходимо формировать фильтр с частотной характеристикой  $H_0(\omega)$  инверсной по отношению к частотной характеристике среды распространения радиоволн  $H_S(\omega)$ . Кроме того, следует учитывать весовой спектральный множитель, зависящий от отношения сигнал-шум для фиксированных гармонических составляющих спектра принятого сверхширокополосного сигнала.

Таким образом, при технической реализации радиолокатора подповерхностного зондирования взрывоопасных предметов для повышения достоверности обнаружения ВП необходимо учитывать наличие априорных сведений о свойствах и параметрах грунта, как среды распространения радиоволн, окружающей ВП и осуществлять коррекцию амплитудно-частотных искажений спектра зондирующего сверхширокополосного сигнала с помощью реализации синтезированного корректирующего фильтра обработки сигналов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Взрывоопасные объекты. Методы и средства поиска, обнаружения, обезвреживания и утилизации. Под ред. В.А. Заренкова — С-Птб, 2002.
2. Landmark. Making Land-Mine Detection and Removal Practical, <http://www.llnl.gov/str/Azevedo.html>
3. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов — для гуманитарного разминирования, криминалистики, археологии,

- строительства и борьбы с терроризмом. — М.: Арбат-Информ, 2004.
1. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред, «Радиосистемы», вып. 86, 2005.
  2. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Под ред. М.И. Финкельштейна. — М.: Недра, 1986.
  3. Г.Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции, т. 1 Теория обнаружения, оценок и нелинейной модуляции. — М.: Сов. радио, 1972.
  4. Карпенко В.И., Фещенко А.Б., Голуб Ю.В., Карпенко О.В. Синтез оптимального алгоритма формирования фазосопряженного поля, реализуемого в раскрыве оптоуправляемых антенн. «Наука і оборона», Збірка наукових матеріалів, вип. 3, Київ, 1994.

## УДК 614.8

*Захаренко О.В., ад'юнкт, УГЗУ,  
Созник А.П., д-р физ.-мат. наук, проф., УГЗУ*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЗАРАЖЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ РЕЗЕРВУАРА С МЕТАНОЛОМ НА ОТКРЫТОМ СКЛАДЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Проведён расчёт опасных зон, возникающих при аварии с полным разрушением резервуара с метанолом. Исследованы варианты распространения газа метанола в первичном и во вторичном облаках. Показано, что с точки зрения последствий такой аварии наибольшую опасность представляет распространение вторичного облака

**Постановка проблемы.** В технологических процессах, связанных с хранением химических веществ на складах предприятий, возможны аварии с выбросом (разливом) опасных химических веществ в атмосферу при разгерметизации или разрушении резервуаров [1]. В случае возникновения такого рода ситуаций не-