

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.962.25

Демьянюк  
Дмитрий Валентинович

Методика формирования, оценки и обработки глубинного портрета объекта в  
системе подповерхностного зондирования

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39 80 02 "Радиотехника, в том числе системы и устройства  
радионавигации, радиолокации и телевидения"

Научный руководитель  
Чугай Константин Николаевич  
кандидат технических наук

Минск 2015

Радары подповерхностного зондирования (РПЗ) предназначены для мониторинга скрытых объектов, они позволяют осуществлять диагностику подземных коммуникаций, грунтов под строительные площадки, дорожных покрытий и взлетно-посадочных полос аэродромов, локальных неоднородностей в грунте, мин, утечек из подземных хранилищ топлива, уровня грунтовых вод, а также проведение геофизических, археологических и других исследований. Существенной спецификой РПЗ является использование сверхширокополосных (СШП) сигналов (видеоимпульсных, с дискретной перестройкой частоты) или непрерывных сигналов с линейным изменением частоты, распространяющихся в средах с ярко выраженным затуханием и дисперсией.

Несмотря на существенные достижения в исследовании и разработке РПЗ, проводимые отечественными и зарубежными фирмами, проблема далека от завершения. В частности, не удается обнаруживать и идентифицировать противопехотные и противотанковые мины с вероятностью 99,6% и малой вероятностью ложных тревог, затруднено выполнение требования к 3-5% (от глубины зондирования) погрешности определения толщины (тем более электрофизических параметров) слоев дорожных покрытий и т. п.

Отметим основные тенденции развития радаров подповерхностного зондирования – это качественное повышение информативности и достоверности интерпретации радиоизображений подповерхностных сред и объектов, сокращение времени мониторинга, исследование и внедрение новых технологий, касающихся как алгоритмов реконструкции и совершенствования программного комплекса, так и модулей РПЗ.

Сегодня разработано и предложено огромное количество различных подходов к реконструкции подповерхностной области. Поэтому появилась необходимость в выработке единого алгоритма для оценки каждого из подходов на основе универсальных для всех параметров, что позволит для каждой задачи выбирать наиболее оптимальный алгоритм получения радиолокационного изображения (РЛИ).

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Цель данной работы:** разработать структуру устройства для формирования РЛИ заглубленных объектов на основе радиолокационной информации РПЗ; разработать подход позволяющий получать оценку качества сформированного РЛИ заглубленного объекта на основе его информативности.

**Задачи исследования:** разработка методики формирования глубинного портрета и РЛИ по результатам зондирования, оценки информативности полученного глубинного портрета и комплексной оценки параметров заглубленного объекта, таких как: глубина залегания, толщина и продольные размеры.

Для выполнения поставленных задач необходимо провести обзор существующих подходов к получению РЛИ, провести анализ рассмотренных методов и их потенциальных возможностей. По результатам анализа существующих подходов необходимо выбрать наиболее подходящий алгоритм формирования РЛИ и провести моделирование.

**Объект исследования:** объектом исследования является методика формирования, оценки и обработки глубинных портретов заглубленных объектов в системе подповерхностного зондирования.

**Предмет исследования:** разработка и дальнейшее использование модели, позволяющей моделировать процесс распространения ЭМВ в грунте, отражение ЭМВ от объекта и дальнейшей обработки отраженного сигнала, с целью получения подробной информации об обнаруженном объекте.

Личный вклад автора выражен в самостоятельной разработке:

- подхода к формированию радиолокационного изображения заглубленного объекта;
- подхода позволяющего получить оценку качества сформированного радиолокационного изображения заглубленного объекта.

Экономическая значимость результатов диссертации обуславливается снижением затрат при решении поисковых задач (поиске локальных неоднородностей в грунте, строительных коммуникаций, мин и т.п.).

Социальная значимость результатов диссертации состоит в реализации обеспечения технологической независимости страны в создании современных средств поиска заглубленных объектов в различных укрывающих средах.

Материалы диссертации докладывались на 51-й научно-технической конференции среди аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция "Радиотехнические системы".

По результатам конференции, тезисы доклада опубликованы в тематическом сборнике.

## 2 КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 2.1 ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Обобщение и развитие голографических принципов регистрации и реконструкции оптических полей на СВЧ-диапазон, стремление эффективно использовать пространственно-временную (ПВ) структуру электромагнитного поля, излучаемого объектами наблюдения привели к появлению радиоголографии и радиоголографических систем. Под радиогографией понимают восстановление геометрических параметров объектов – форма, ориентации и локализации.

Радиоголография предполагает когерентную в ПВ-смысле регистрацию электромагнитного поля в виде конечного числа пространственных выборок амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в элементах или позициях регистратора и когерентную реконструкцию излучающих (рассеивающих) электромагнитное поле объектов в виде их радиоизображений.

Традиционные процедуры интерпретации результатов подповерхностного зондирования и идентификации объектов возлагаются на оператора, что снижает достоверности интерпретации и оперативность мониторинга и существенно сдерживает использование радара подповерхностного зондирования (РПЗ) для решения широкого спектра задач. Повышение достоверности диагностики и идентификации подповерхностных областей и объектов по результатам радиозондирования возможно на основе реконструкции их геометрических и электрофизических параметров, что приводит к необходимости решения обратных задач рассеяния (разработка подобных аппаратных и программных технологий находится в центре внимания). При их решении, как правило, можно выделить несколько групп задач: формирование радиоизображений, локализация и реконструкция внешних границ объектов, реконструкция профилей объектов и их электрофизических параметров ( томографические алгоритмы для двух- и трехмерных задач; регуляризирующие алгоритмы А.Н. Тихонова; генетические (или гибридные) алгоритмы; метод конечных разностей во временной области).

Обратные задачи подповерхностного зондирования целесообразно разделить на два класса.

*Первый класс* - структурные задачи (мониторинг дорожных покрытий, взлетно-посадочных полос, мостов и т.п.), для которых априорная информация может быть получена из соответствующей строительной документации. Последняя позволяет установить связь между структурой покрытий и их электрофизическими параметрами. Для этого класса задач в качестве основных элект-

троединамических моделей выбираются слоистая (квазислоистая) среда, где  $\varepsilon(x,y,z)=\varepsilon_i$  при  $Z_{i-1}(x,y)<Z<Z_i(x,y)$ ,  $i=1\dots N$ ;  $Z=Z_{i-1}(x,y)$  и  $Z=Z_i(x,y)$  - поверхности, ограничивающие  $i$ -й слой переменной толщины  $h_i(x,y)=Z_{i-1}(x,y)-Z_i(x,y)$ , причем  $Z_0=0$  и  $Z_n=\infty$ .

*Второй класс* - поисковые задачи (поиск локальных неоднородности в грунте, строительных коммуникаций, мин и т.п.). Для этого класса задач в качестве основных электродинамических моделей выбираются слоистая (квазислоистая) среда с локальными цилиндрической, сферической или эллиптической неоднородностями, расположенными наклонно к границе раздела.

К одной из важных задач требующих первоочередного решения относится задача рассмотрения распространения ЭМВ в грунте.

Уравнение Максвелла в дифференциальной форме для гармонических полей в изотропных линейных поглощающих средах (понятие "линейный" означает, что комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости не зависят от напряженности поля) имеют решение в виде плоской волны, характеризующейся взаимно перпендикулярными векторами [22]

$$\dot{e}(x,t) = \dot{E}_0 e^{(j\omega t - \dot{\gamma}x)} \text{ и } \dot{h}(x,t) = H_0 e^{(j\omega t - \dot{\gamma}x)}, \quad (1)$$

распространяющейся в положительном направлении оси  $x$ .

Фазовая скорость распространения волны в данной среде (при  $\dot{\mu} = 1$ )

$$v_\phi = c / (\text{Re}\sqrt{\dot{\varepsilon}}); \quad (2)$$

Комплексный показатель преломления

$$\dot{n} = \sqrt{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\varepsilon'(1 - j\text{tg}\delta)} = \text{Re}\sqrt{\dot{\varepsilon}} - j\text{Im}\sqrt{\dot{\varepsilon}} = c/v_\phi - j\alpha/w. \quad (3)$$

Отношение амплитуд колебаний  $E_0/E(x) = e^{\alpha x}$  - степень затухания волны на расстоянии  $x$ , оценивается в неперах (Нп).

$$L = \ln [E_0/E(x)] = \alpha x,$$

или в децибелах (дБ)

$$L = 20 \lg [E_0/E(x)] = 8,68\alpha x. \quad (4)$$

Удельное затухание, т.е. затухание на единицу длины (дБ/м)

$$\Gamma = (1/x)20 \lg [E_0/E(x)] = 8,68\alpha, \quad (5)$$

Метод подповерхностной радиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства – электропроводность и диэлектрическая проницаемость.

При обработке отраженного сигнала формируется радиолокационное изображение (РЛИ) сканируемого участка поверхности, которое позволяет решить задачу обнаружения и оценить параметры заглубленного объекта. При этом определяющую роль играет выбор подхода формирования РЛИ. В литературе наиболее часто встречаются и хорошо описаны следующие подходы:

- Спектральные методы: голографический и томографический. Данные методы основаны на преобразовании Фурье. Достоинство спектральных методов: простота в реализации. Недостаток: малая разрешающая способность, которая определяется шириной спектра ЗС.

- Методы основанные на синтезе апертуры. Сканирование осуществляется путем фокусировкой сканирующего луча в каждую точку у поверхности среды. Такой подход позволяет существенно повысить разрешающую способность. Достоинства: высокая разрешающая способность, в источниках сообщается о достижении разрешающей способности до 1 см. Недостатки: фокусировка сканирующего луча требует больших вычислительных ресурсов, также повышая разрешающую способность уменьшается максимальная глубина зондирования.

- Метод дальностной миграции. Данный метод является усовершенствованием спектральных методов. Достоинства: восстановление 3D-изображений. Недостаток: низкая разрешающая способность.

- Метод максимального правдоподобия. Метод обеспечивающий «сверхразрешение», однако только при высоком отношении сигнал/шум. Достоинства: высокая разрешающая способность. Недостатки: данный метод является некоррелированным, т.е. при восстановлении РЛИ не учитываются результаты предыдущих сканов.

В данной работе будет рассмотрены результаты полученные двумя методами: спектральным и методом максимального правдоподобия.

## **2.2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

К основным параметрам среды, которые определяют качество работы РПЗ, это диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла потерь  $tg\delta$ , который определяет мощность отраженного сигнала. Значение диэлектрической проницаемости грунта зависит от влажности, температуры и изменяется в зависимости от плотности и структуры. Поэтому точно оценить диэлектрическую проницаемость практически не возможно. Тангенс угла потерь оказывает меньшее влияние на качество функционирования РПЗ и определяет лишь отношение сигнал/шум.

Механизм распространения ЭМВ приведен на рисунке 1. Принятый сигнал является суммой трех составляющих:

а)  $\dot{E}_0 \dot{R}_{1-2} \sim n(t)$ ;

б)  $\dot{E}_0 \dot{T}_{1-2} \dot{R}_{2-3} \dot{T}_{2-1} \exp(-2\dot{\gamma}_2 h) \sim m_b(t)$ ;

в)  $(1 - \dot{R}_{1-2}^2)(1 - \dot{R}_{2-3}^2) \dot{R}_{3-4} \exp(-2\dot{\gamma}_2 h_2 - 2\dot{\gamma}_3 h_3) \sim m_n(t)$ ,

где  $n(t)$  – сигнал отраженный от земной поверхности;

$m_b(t)$  и  $m_n(t)$  – отражение от верхней и нижней стенок цели соответственно;

$R$  – коэффициент отражения;

$T$  – коэффициент прохождения;

$h$  и  $\gamma$  – толщина и постоянная распространения соотв. слоя.

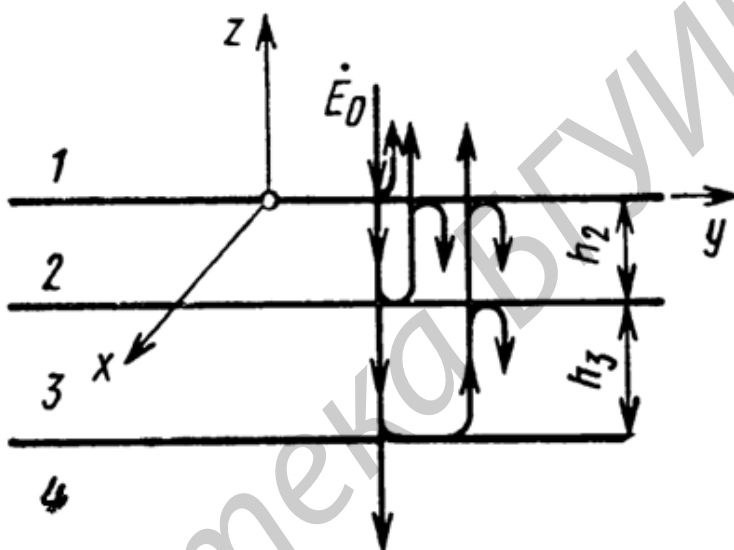


Рисунок 1 – Формирование отраженного сигнала

Принятый сигнал  $f(t) = n(t) + m(t) + h(t)$  представляет собой аддитивную смесь помехи  $h(t)$ , в качестве которой выступает белый шум, сигнала отраженного от земной поверхности  $n(t)$  и заглубленного объекта  $m(t)$ . При этом сигнал отраженный от цели определяется выражением

$$m(t) = m_b(t) + m_n(t). \quad (6)$$

Результат весовой обработки принятого сигнала  $\mathbf{M}_F$  размерностью  $N_S \times N_M$  формируется в соответствии с выражением

$$\mathbf{M}_F = \mathbf{M}_f \times \mathbf{M}_w, \quad (7)$$

где  $\mathbf{M}_w$  – весовая матрица, представляет собой диагональную матрицу размерностью  $N_M \times N_M$ ;

$\mathbf{M}_f$  – матрица принятого сигнала на выходе смесителя после аналого-цифровой обработки размерностью  $N_S \times N_M$ ;

$N_M$  – количество временных реализаций полученных в процессе сканирования участка поверхности;

$N_S$  – количество отсчетов принятого сигнала в одной временной реализации.

С целью обеспечения требуемых характеристик обнаружения (распознавания) далее реализуется компенсация помехи, где в качестве помехи выступает сигнал, отраженный от сканируемой поверхности. Результат компенсации в виде оценки матрицы сигнала, отраженного от заглубленного объекта, размерностью  $N_S \times N_M$  формируется в соответствии с выражением

$$\mathbf{M}_m = \mathbf{M}_F - \mathbf{M}_z, \quad (8)$$

где  $\mathbf{M}_z$  – оценка матрицы сигнала, отраженного от сканируемого участка поверхности, размерностью  $N_S \times N_M$ .

Радиолокационный портрет  $\mathbf{P}$  формируется в соответствии адаптивным алгоритмом на основе метода максимального правдоподобия [24]. Матрица-столбец комплексно сопряженных амплитуд глубинного портрета определяется в соответствии с выражением

$$\mathbf{P} = [\mathbf{S}_0^{<n>T} \mathbf{Q} \mathbf{S}_0^{<n>}]^{-1}, n = \overline{0, N_f - 1}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1}$  – обратная ковариационная матрица полученная для  $m$ -го столбца матрицы  $\mathbf{M}_m$ ;

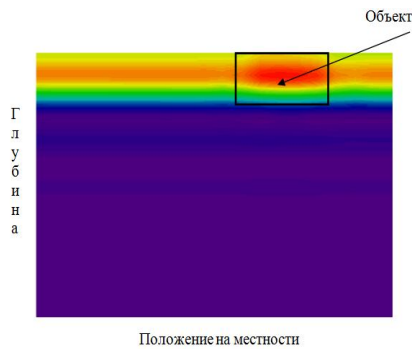
$N_f = N_S / 2$  – число элементов сформированного глубинного портрета;

$\mathbf{S}_0$  – матрица опорных частот.

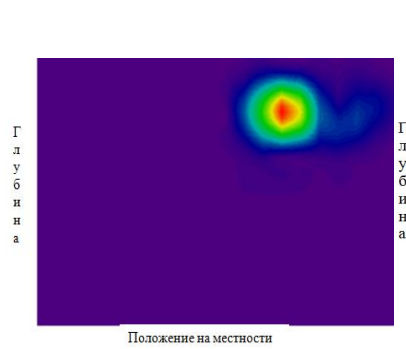
Проведение моделирования работы РПЗ и переход к обработке данных полученных в реальных условиях показал адекватность выбранного подхода.

РЛИ полученные в результате моделирования представлены на рисунках 3, 4 и 4, а результат обработки реальных данных – на рисунках 5, 6, 7.

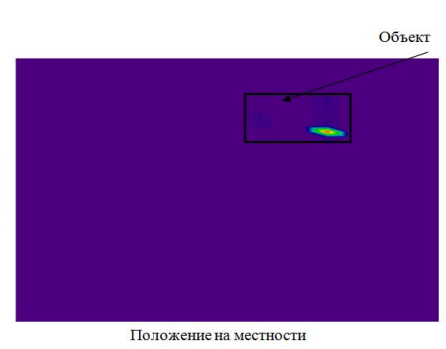




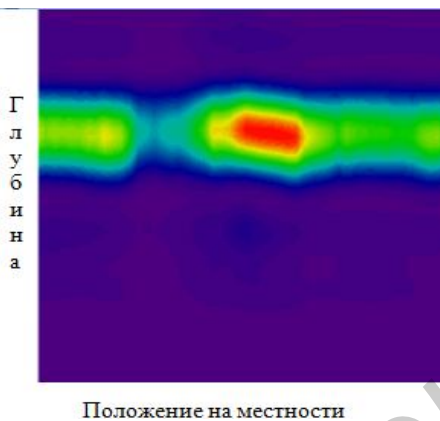
**Рисунок 2 – РЛИ полученное в результате моделирования спектральным методом без компенсации мешающего отражения от земной поверхности**



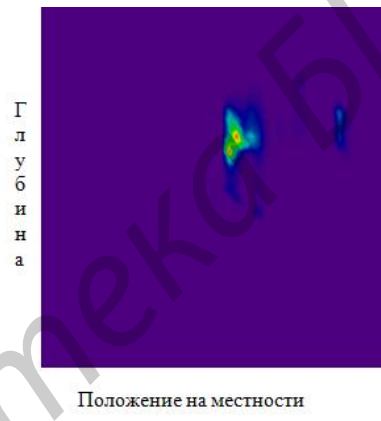
**Рисунок 3 – РЛИ полученное в результате моделирования спектральным методом после компенсации мешающего отражения от земной поверхности**



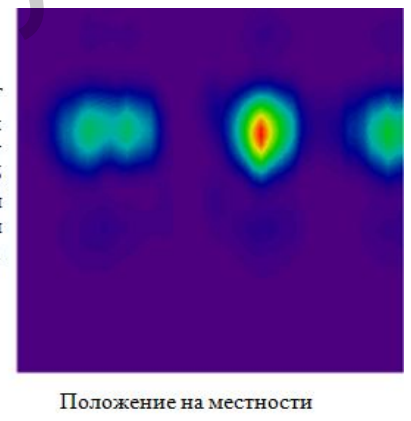
**Рисунок 4 – РЛИ полученное в результате моделирования методом максимального правдоподобия**



**Рисунок 5 – РЛИ полученное в результате обработки реальных данных спектральным методом без компенсации мешающего отражения от земной поверхности**



**Рисунок 6 – РЛИ полученное в результате обработки реальных данных спектральным методом после компенсации мешающего отражения от земной поверхности**



**Рисунок 7 – РЛИ полученное в результате обработки реальных данных методом максимального правдоподобия**

## 2.3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Для решения задач выбора наиболее оптимального метода введем понятие информативности. Под *информативностью* будем понимать количество информации которое позволяет получить тот или иной метод восстановления РЛИ, и точность этой информации, которая позволит отнести объект к то-

му или иному классу (классифицировать его). Классификация объекта производится по совокупности признаков. Но какой из признаков называть информативным? Информативный признак – это признак, имеющий близкие значения на элементах (объектах) одного класса и существенно различные значения на элементах разных классов.

Отсюда следует, что для эффективного решения задачи распознавания в алгоритмах классификации необходимо перейти к использованию признаков, обладающих отмеченным свойством. Область допустимых значений  $\Omega$  определим следующим образом. Представим всю совокупность элементов обучающей выборки, которую предполагаем известной, в виде строк матрицы  $X \in R_+^{n \times m}$ . Пусть  $k$  – число распознаваемых классов,  $\xi(x_{ij})$  – номер класса, которому соответствует значение  $x_{ij}$   $j$ -го признака на  $i$ -ом элементе выборки. Тогда информативность  $j$ -го признака (столбца  $X_j$  матрицы  $X$ ) можно оценить на основе решения задачи

$$I(x) = h(x) - h(x/\Omega) = \ln(\mathbf{p}^T \mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^{-T} \mathbf{p}) - \min_{\mathbf{w} \in \Omega} \ln(\mathbf{p}/\mathbf{w})), \quad (10)$$

с областью определения  $\Omega$  в виде

$$\Omega = \{\mathbf{w} \in \mathbf{R}_+^{n \times 1} | w_u = w_v \leftrightarrow \xi(x_{uj}) = \xi(x_{vj}) \forall j = \overline{1, m}\}, \quad (11)$$

где  $I(x)$  – информационный критерий;

$h(x)$  – мера различий компонент вектора  $\mathbf{x}$  или информационной мерой, поскольку, там, где есть различия, там есть и информация;

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2 \dots p_n)^T | \sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен механизм распространения ЭМВ в грунте.
2. Проведен анализ существующих подходов к формированию РЛИ в РПЗ.
3. Разработан алгоритм формирования РЛИ в соответствии с методом максимального правдоподобия.
4. Произведено моделирование работы РПЗ с учетом особенностей распространения ЭМВ в грунте, отражения от границ раздела сред и последующая обработка принятого сигнала. Сформировано РЛИ участка поверхности в результате моделирования сканирования.
5. Проведены эксперименты по обнаружению заглубленного объекта и оценке его параметров. Эксперименты проводились в реальных условиях. В результате были получены РЛИ для двух типовых объектов и произведена оценка их параметров. При этом ошибка оценки толщины составила для мины ПМН-2 3-24% от истинного значения, для мины ТМ-62М – 3-14%; ошибка при оценке глубины для мины ПМН-2 – 2,2-6,6% от истинного значения, для мины ТМ-62М – 2,8-21%.

Также выявлен ряд проблем требующих дальнейшего исследования и поиска новых методов решения:

- при осуществлении сканирования высота подъема не остается постоянной, что приводит к необходимости оценки высоты подъема раскрыва антенны над поверхностью земли и введения коррекции при осуществлении оценок;
- эффективность алгоритма формирования строга снижается при ярко выраженной многомодовости принятого сигнала;
- при моделировании параметры укрывающей среды задавались точно и оставались постоянными, в то время как в реальных условиях грунт содержит
- неоднородности и примеси, которые приводят к изменению параметров грунта в различных участках объема, что в свою очередь уменьшает точность их оценки, и, как следствие к ошибкам при измерении параметров заглубленного объекта.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1 – А.] Демьянюк Д.В. Достоверность оценок диэлектрической проницаемости среды, как фактор, снижающий качество оценок параметров заглубленного объекта / Д.В. Демьянюк, К.Н. Чугай // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов. Материалы секции "Радио технические системы" – БГУИР, 2015 – С. 54.

Библиотека БГУИР