

УДК 621.396.969

Г.Л. Черниховская, И.А. Татомир

**ПРИМЕНЕНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭХОСИГНАЛОВ В ЗАПРЕГРАДНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ**

*Рассматриваются вопросы, связанные с обработкой сверхширокополосных (СШП) эхосигналов в радиолокаторах, предназначенных для обнаружения людей под завалами или за другими преградами. Задачи, решаемые в этом случае, относятся к задачам локационного обнаружения объектов в сложных средах с поглощением. Целью работы является теоретический анализ возможности реализации и эффективности методов согласованной фильтрации СШП-сигналов при распространении их в среде с частотно-зависимым поглощением. В качестве меры эффективности выбрано нормированное отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе фильтра при некоррелированной нормальной помехе. Получены аналитические выражения ОСП для двух фильтров – адаптивного перестраиваемого в соответствии с изменениями формы и спектра СШП-эхосигнала и неперестраиваемого, согласованного с зондирующим СШП-сигналом. Для двух основных типов зондирующих СШП-сигналов проведены количественные расчеты зависимости ОСП от параметров препятствия – коэффициента поглощения и его толщины. На основании полученных результатов делается вывод, что при большом поглощении или большой толщине преграды необходимо применять адаптивный фильтр. Для его реализации необходимо знать параметры препятствия. С этой целью рассчитаны и приводятся в таблице значения параметра поглощения пространственных строительных материалов. Для определения толщины стены предлагается метод экспресс-анализа начального участка эхосигнала и выделения составляющих, отраженных от самого препятствия.*

*Радиолокация; сигнал; сверхширокополосный; спектр сигнала; поглощение; фильтрация; согласованная; отношение сигнал/помеха; диэлектрическая проницаемость.*

G.L. Chernihovskay, I.A. Tatomir

**USING MATCHED FILTERING FOR THE PROCESSING OF ULTRAWIDE-BAND SIGNALS IN THE BEHIND BARRIERING RADIOLOCATION**

*The questions connected with processing ultrawideband (UWB) echo-signals in radars, intended for detection of people under blockages or behind other barriers. The problems solved in this case, are concerning to radar detection problems of objects in complex absorbing medium. The job purpose is the theoretical analysis of possibility of realisation and efficiency of methods of matched filtration of UWB signals at their spreading in frequency-dependent absorption medium. As an efficiency measure it is chosen the rationed signal-to-noise ratio (RSN) on a filter output for not correlated Gauss noise. Analytical expressions of the RSN for two filters – adaptive reconstructed according to changes of the form and spectrum of the UWB signal and not reconstructed, matched with probing a UWB signal are received. For two basic types of probing UWB signals quantitative calculations of dependence of the RSN from barrier parameters - absorption factor and its thickness – are carried out. On the basis of the received results the conclusion becomes, that at the big absorption or the big thickness of a barrier it is necessary to apply the adaptive filter. For its realisation it is necessary to know a barrier parameters. Parameters of absorption of widespread building materials are calculated and given in the table. For definition of a thickness of a barrier the method of the express analysis of an initial site of a echo-signal and a selection of the components reflected from the barrier is offered*

*Radar-location; a signal; ultra wide band; Signal spectrum; Absorption; filtration; the matched; signal-to-noise ratio; Dielectric permeability.*

Одним из направлений запреградной радиолокации является радиобиолокация – обнаружение биологических объектов (людей, животных и др.) за оптически непрозрачными препятствиями (завалами). Это – одна из весьма сложных задач, имеющих высокое практическое значение. Возможность обнаружения людей, попавших под завалы в результате техногенных и природных катастроф (землетрясений, террористических операций, несчастных случаев и т.д.), позволяет более оперативно оказывать помощь пострадавшим, увеличивая шансы на их спасение. Основной особенностью этого направления радиолокации являются потери энергии при прохождении сигнала через препятствие вследствие отражения на границах раздела физических сред и частотно-зависимого поглощения (затухания) в материале препятствия (кирпич, бетон, почва и др.). Поэтому в радиобиолокации применяются сверхширокополосные (СШП) сигналы [1]. Такие сигналы, с одной стороны, обеспечивают требуемое для обнаружения людей высокое разрешение, обладая большой энергетической шириной спектра, а с другой стороны, их спектральные составляющие сдвинуты в достаточно низкочастотную область для уменьшения потерь энергии в материале препятствия.

Вследствие частотно-зависимого поглощения в материале препятствия спектры СШП-эхосигналов могут значительно отличаться от спектров зондирующих сигналов, что снижает эффективность обычных систем обработки сигналов. Поэтому актуальным является вопрос о применении оптимальной фильтрации при обработке эхосигналов с точки зрения выбора принципов построения структуры и параметров согласованных фильтров. Подобные задачи возникают в радио- и в гидролокации при обнаружении объектов, находящихся в сложных средах с поглощением. Ряд результатов их решения в гидролокации при обнаружении объектов, находящихся на дне или в грунте [2, 3, 6, 7], могут быть использованы в СШП-радиолокации.

Целью данной работы является теоретический анализ эффективности различных алгоритмов согласованной фильтрации СШП-эхосигналов и рассмотрение возможностей для их реализации в биолокаторе.

В статье рассматриваются методы согласованной фильтрации эхосигналов от объектов, находящихся за оптически непрозрачными препятствиями (стенами); в качестве физико-математической модели биообъектов (людей) выбрана упрощенная модель [4]; прием эхосигналов осуществляется на фоне аддитивной некоррелированной гауссовой помехи со спектральной плотностью  $N_0$ . Поглощение энергии волн при прохождении через препятствие учитывается в виде частотного коэффициента передачи линейного четырёхполюсника, который можно аппроксимировать в первом приближении функцией [5]:

$$K_c(\omega, d) = e^{-\beta|\omega|d}, \quad (1)$$

где  $d$  – пройденное расстояние в среде с поглощением (толщина стены),  $\beta$  – коэффициент поглощения среды

$$\beta = 3,66 \cdot 10^{-11} a, \quad (2)$$

$a$  – табличная величина затухания  $\left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м} \cdot \text{ГГц}} \right]$  в препятствии.

В этом случае спектр  $S(j\omega)$  эхосигнала определяется как результат прохождения зондирующего сигнала со спектром  $S_0(j\omega)$  через четырёхполюсник (1):

$$S(j\omega) = S_0(j\omega) \cdot K_c(\omega, d). \quad (3)$$

В [6] рассмотрены алгоритмы согласованной фильтрации СШП-сигналов, распространяющихся в средах с поглощением применительно к гидролокации. Эти же алгоритмы применимы для заградной СШП-радиолокации:

- ◆ адаптивный алгоритм, в котором частотная характеристика согласованного фильтра перестраивается в соответствии с изменением формы эхосигнала. Этот фильтр позволяет достигнуть наилучших результатов фильтрации и является в этом смысле «абсолютно оптимальным», но необходимость перестройки частотной характеристики усложняет его аппаратную реализацию;
- ◆ неадаптивный алгоритм, согласно которому фильтр является неперестраиваемым и согласованным с зондирующим сигналом. Он более прост в реализации, но не оптимален.

Для анализа эффективности этих алгоритмов фильтрации было выбрано нормированное отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе каждого фильтра

$$n(q) = \frac{q}{q_{\max}}, \quad (4)$$

где  $q = \frac{u_{\max}(t)}{\sigma_{uu}}$ ;  $u_{\max}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_0(j\omega) K_\phi(j\omega) e^{-j\omega(t-\tau_\phi)} d\omega$  – максимальное значение

выходного сигнала, определяемое в момент  $t = \tau_\phi$ ;  $\sigma_{uu}^2$  – дисперсия шума на выходе фильтра;  $K_\phi(j\omega)$  – комплексная передаточная характеристика фильтра;  $\tau_\phi$  – постоянная времени фильтра,  $S_0(j\omega)$  – сигнал на входе фильтра;

$q_{\max}^2 = q^2|_{d=0} = \frac{1}{2\pi \cdot N_0} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(j\omega)|^2 d\omega$  – максимальное значение ОСП (по мощности) при  $d=0$ .

Для адаптивного фильтра нормированное значение ОСП (4) определяется выражением

$$n^2(q) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |S_0(j\omega)|^2 \cdot K_c^2(\omega, d) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |S_0(j\omega)|^2 d\omega}, \quad (5)$$

а для неперестраиваемого фильтра соответственно

$$n(q) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |S_0(j\omega)|^2 \cdot K_c(\omega, d) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |S_0(j\omega)|^2 d\omega}. \quad (6)$$

В работе был проведен сравнительный анализ алгоритмов фильтрации применительно к двум основным моделям СШП-зондирующих сигналов:

– радиопульс с прямоугольным спектром, который можно интерпретировать как простой радиопульс с огибающей вида  $\frac{\sin x}{x}$  или как сложный сигнал с внутриимпульсной модуляцией:

$$S_0(j\omega) = \begin{cases} A, & \omega_H \leq |\omega| \leq \omega_B; \\ 0, & |\omega| < \omega_H; |\omega| > \omega_B; \end{cases} \quad (7)$$

где  $\omega_B = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$ ,  $\omega_H = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}$ ,  $\omega_0$  – центральная частота сигнала,  $\Delta\omega$  – энергетическая ширина спектра сигнала;

– моноцикл Гаусса [7], представляющий первую производную Гауссового импульса, он хорошо отражает физику процессов при использовании ударного возбуждения антенны

$$s(t) = A_m \frac{t}{t_m} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{t^2}{t_m^2} - 1 \right] \right\}, \tag{8}$$

где  $A_m$ ,  $t_m = \frac{1}{\omega_0}$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – параметры модели.

В табл. 1 приведены аналитические выражения для ОСП (4) на выходах фильтров, полученные по формулам (5) и (6) для сигналов (7) и (8).

Таблица 1

Тип фильтра	Вид сигнала	Нормированное отношение сигнал/помеха $n^2(q) = \frac{q^2}{q_{max}^2}$
Адаптивный	С прямоугольным спектром (7)	$\frac{e^{-\beta d (\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2})}}{\Delta\omega \cdot \beta \cdot d} \cdot (1 - e^{-\beta d \Delta\omega})$
Неперестраиваемый		$\frac{4 \cdot e^{-\beta d (\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2})}}{(\Delta\omega \cdot \beta \cdot d)^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\beta d \Delta\omega}{2}}\right)^2$
Адаптивный	Моноцикл	$e^{\beta^2 \omega_0^2 d^2} \left\{ (1 + 2\beta^2 \omega_0^2 d^2) \cdot [1 - \Phi(\beta \omega_0 d)] \right\} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \beta \omega_0 d$
Неперестраиваемый	Гаусса (8)	$e^{\frac{\beta^2 \omega_0^2 d^2}{4}} \left\{ \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 \omega_0^2 d^2\right) \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta \omega_0 d}{2}\right)\right] \right\} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \beta \omega_0 d$

Здесь  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  – интеграл вероятности.

Из соотношений, приведенных в табл. 1, следует, что при увеличении толщины стены  $d$  или поглощения в среде  $\beta$  значения нормированного ОСП меняются нелинейно. Так как поглощение  $\beta$  определяется в соответствии с (2) параметром среды  $a$  и в выражения для ОСП входит произведение величин  $\beta \cdot d$ , то целесообразно при его анализе в качестве параметра ввести переменную  $\mu$ :

$$\mu = a * d.$$

При неизменном параметре  $a$  изменение  $\mu$  происходит за счет изменения толщины стены  $d = \frac{\mu}{a}$ , при постоянной толщине – за счет параметра  $a = \frac{\mu}{d}$ .

Рассчитанные по формулам табл. 1 зависимости ОСП  $n^2(q)$  при изменении  $\mu$  приведены на рис. 1, 2 для сигналов с прямоугольным спектром и моноцикла Гаусса соответственно. Кривые, изображенные на рисунках непрерывными линиями, соответствуют адаптивному фильтру, штриховыми линиями – неперестраиваемому

му. Значения  $\mu$  варьировались от 0 до 200, что охватывает случаи как слабо поглощающих сред при малых  $a$  и  $d$ , так и сильно поглощающих сред, например, с толщиной стены  $d_{max}=1,5$  м и поглощением  $a_{max}=135$ . Расчеты проводились при постоянном коэффициенте широкополосности сигналов  $\gamma = \frac{\Delta F}{f_0} = 1,2$  для трех значений энергетической ширины спектра  $\Delta F$ . Из них только наибольшее значение  $\Delta F=1,2$  ГГц удовлетворяет условию разрешения малых объектов (людей) [4].

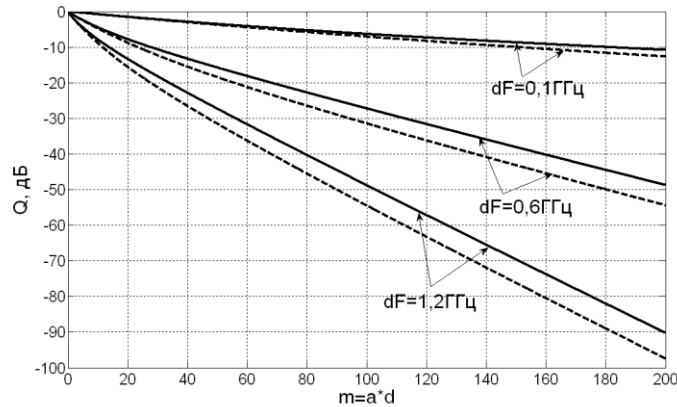


Рис. 1. Зависимости нормированного отношения сигнал/помеха для сигналов с прямоугольным спектром

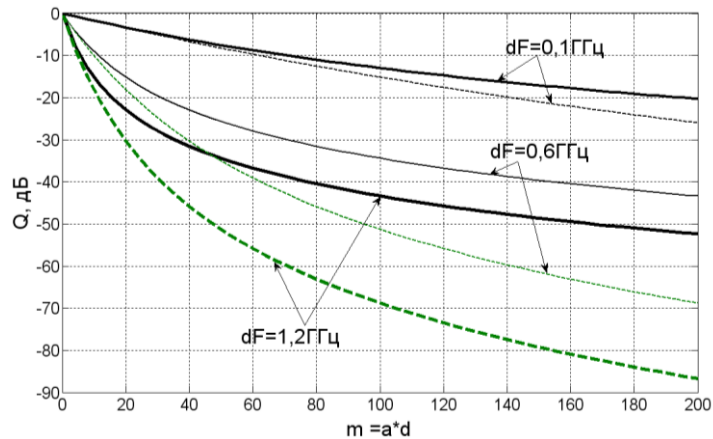


Рис. 2. Зависимости нормированного отношения сигнал/помеха для сигналов типа моноцикла Гаусса

Сравнительный анализ рис. 1 и 2 показывает, что при параметрах сигналов, соответствующих требованиям разрешения биообъектов, применение моноцикла Гаусса дает лучшие результаты в сильно поглощающих средах при  $\mu > 40$ , помехоустойчивость для этого сигнала при адаптивной фильтрации превосходит показатели сигналов с прямоугольным спектром почти на 40 дБ при  $\mu \geq 200$ . Рассмотрение графиков рис. 2 доказывает явное преимущество применения адаптивной фильтрации: для больших  $\mu$  ей проигрывает непереключаемый фильтр на 20 дБ при  $\mu \geq 100$  и 40 дБ при  $\mu \geq 200$ .

Таким образом, наилучшую помехоустойчивость обеспечивает адаптивный алгоритм фильтрации. Но для его реализации необходимо, с одной стороны, устройство аппаратуры, связанное с перестройкой фильтра, и, с другой стороны, – сведения о параметрах среды – в нашем случае о ее поглощении и толщине препятствия. Поскольку в реальных условиях нет априорной информации о толщине  $d$  преграды и ее параметре  $a$ , принципиально невозможно создать адаптивный фильтр, который был бы согласован с экосигналом во всем диапазоне изменения внешних факторов.

Рассмотрим ситуацию, когда известны данные по поглощению электромагнитных волн в строительных материалах [8–10]. Поглощение электромагнитных волн в справочных материалах дается как  $b_{табл}[\frac{дБ}{м}] / f_{табл}$ . Эта величина связана с  $a$  зависимостью

$$a = \frac{b_{табл}[\frac{дБ}{м}]}{f_{табл}[ГГц]}.$$

Из экспериментальных значений в таблицах, имеющихся в [8–10], для пространственных строительных материалов были найдены по методу наименьших квадратов значения  $a$ , приведенные в табл. 2 [5].

Таблица 2

Материал	$a$ , дБ/(м·ГГц)
Цемент (объемная влажность 20 %)	124
Красный кирпич, дерево (объемная влажность 20 %)	31
Красный кирпич сухой	0,8
Красный кирпич (2 % весовой влажности)	10,5
Красный кирпич (15 % весовой влажности)	37,5

Полученные значения параметра  $a$  можно использовать как некоторое приближенное значение параметра поглощения при синтезе оптимального фильтра, поскольку оно существенно зависит от внешних условий, в особенности от влажности.

Второй недостающий параметр – толщину стены  $d$  – можно определить экспериментально, если по визуальному осмотру стены можно определить ее материал и соответственно ориентировочное значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Вычисления проводятся непосредственно в процессе локации без применения дополнительной аппаратуры. Это достигается посредством анализа начального участка принятого сигнала, содержащего составляющие, обусловленные отражением зондирующих сигналов от внутренней и внешней по отношению к антенне локатора границ воздух/стена и стена/воздух [11]. Эти составляющие несут информацию о  $d$  и  $\epsilon$ , что позволяет найти одну из этих величин, в данном случае  $d$ . Идея таких измерений заключается в оценке искомой  $\epsilon$  по сигналам, отраженным от препятствия в обратном направлении (к локатору).

Так как в случае биолокации пространственная протяженность зондирующих СШП сигналов имеет порядок единиц см, а среднеквадратичные значения шероховатостей поверхности стены составляют доли см, то стену можно рассматривать как гладкую отражающую поверхность, а отражение от нее – как зеркальное. При достаточно близком расположении антенного блока локатора к стене оказывается возможным относительно просто оценить искомые параметры по экосигналам, отраженным от ближней и дальней к антенне поверхностей стены. Для отраженного сигнала в плоскости антенны получено следующее соотношение [11]:

$$u_{\text{Аомр}}(t) = K_{0\text{омр}} \cdot K_{1\text{омр}} \left\{ u_{\text{изл}} \left( t - \frac{2x_1}{C_0} \right) - \sum_{i=1}^{\infty} (a^{i-1} - a^i) \cdot u_{\text{изл}} \left( t - \frac{2x_1}{C_0} - \frac{2i\sqrt{\varepsilon}d}{C_0} \right) \right\}, \quad (9)$$

где  $u_{\text{изл}}(t)$  – излучаемый сигнал;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала стены;  $x_1$  – расстояние от плоскости антенны до ближней поверхности стены;

$$C_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - \text{ скорость волны; } K_{0\text{омр}} = -\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1 + 2\sqrt{\varepsilon}}; \quad a = \frac{\varepsilon + 1 - 2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon + 1 + 2\sqrt{\varepsilon}};$$

$$K_{1\text{омр}} = 1 \text{ для плоской волны и } K_{1\text{омр}} = \frac{1}{2x_1} - \text{ для сферической.}$$

Как видно из (9), отраженный сигнал представляет сумму из отразившегося от ближней поверхности стены сигнала  $u_{\text{изл}}(t)$  и слагаемых  $(a^{i-1} - a^i) \cdot u_{\text{изл}} \left( t - \frac{2i\sqrt{\varepsilon}d}{C_0} \right)$ , представляющих отраженный сигнал, прошедший  $i$  раз стену в обе стороны. Эти составляющие сдвинуты относительно друг друга на время

$$\Delta\tau = \frac{2\sqrt{\varepsilon}d}{c_0}. \quad (10)$$

В результате можно путем анализа начального участка принятого сигнала локатора определить запаздывание  $\Delta\tau$  составляющих относительно друг друга, а затем из (10) рассчитать толщину препятствия

$$d = \frac{c_0 \Delta\tau}{2\sqrt{\varepsilon}}.$$

Таким образом, на основании справочных данных о поглощении и диэлектрической проницаемости материала препятствия представляется возможным рассчитать параметры  $a$  и  $d$  адаптивного фильтра. Однако насколько совпадут результаты его применения с ожидаемыми теоретическими (табл. 2 и рис. 1–2), зависит от того, насколько справочные значения  $b_{\text{табл}}$  и  $\varepsilon$  соответствуют реальным. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

В многосенсорных запреградных радарх необходимые для синтеза адаптивного фильтра параметры могут оцениваться непосредственно из результатов локации. Применение предложенной в статье методики позволяет уменьшить число сенсоров в этих радарх.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биорадиолокация / Под ред. Бугаева А.С., Ивашова С.И., Иммореева И.Я. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 396 с.
2. Черниковская Г.Л. Поиск с помощью сверхширокополосных сигналов малоразмерных объектов, погруженных в толщу морского дна // Радиотехника. – 2009. – № 9. – С. 4-9.
3. Махонин Г.М., Федосов В.П., Черниковская Г.Л. Обнаружение локационных объектов в сложных средах с поглощением // Радиотехника. – 2006. – № 2. – С. 90-95.
4. Черниковская Г.Л. Упрощенная физико-математическая модель биообъектов при их обнаружении за оптически непрозрачными препятствиями // Материалы международной научной конференции «Методы и алгоритмы принятия эффективных решений». – Ч. 4. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 88-90.
5. Махонин Г.М., Черниковская Г.Л. О расчете поглощения энергии сверхширокополосных сигналов в среде с потерями // Материалы международной научной конференции «Методы и алгоритмы принятия эффективных решений». Ч. 4. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 52-57.

6. Черниковская Г.Л., Мусатова М.М. Влияние среды распространения на помехоустойчивость согласованной фильтрации сверхширокополосных гидроакустических сигналов // Материалы международной научной конференции «Оптимальные методы решения научных и практических задач». Ч. 3. «Оптимизация исследований в области естественных наук». – Таганрог: ТРТУ, 2005. – С. 85-95.
7. Покровский Ю.О., Черниковская Г.Л. Модель сверхширокополосных локационных сигналов в виде производной от гауссова видеоимпульса // Материалы международной научной конференции «Информационные технологии в современном мире». Ч. 4. – Таганрог: ТРТУ, 2006. – С. 63-67.
8. Лещанский Ю.И., Улянычев Н.В., Лебедева Г.Н., Попова Н.Я., Метелкина Е.Д. Электрические параметры кирпича, цемента и древесины в диапазоне метровых-сантиметровых радиоволн. ВИНТИ, рег. № 4772-82.
9. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
10. Чубинский Н.П. Методы радиовидения через поглощающие экраны. Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике // Сб. докладов Второй Всероссийской научной конференции-семинара. Муром, 4-7 июля 2006 г. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2006. – 507 с.
11. Черниковская Г.Л., Дорошенко С.Ю. Способ уменьшения погрешности определения координат при локации биообъектов за препятствиями // Материалы докладов Всероссийской научной школы и конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». 30.06-3.07. – Муром, 2009.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Костров.

**Черниковская Галина Леонидовна** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: glchernih@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

**Татомир Инга Александровна** – e-mail: princes\_maikop@mail.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; аспирантка.

**Chernihovskay Galina Leonidovna** – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: glchernih@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Tatomir Inga Aleksandrovna** – e-mail: princes\_maikop@mail.ru; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 004.932.2

**В.В. Воронин**

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ\***

*Рассмотрены вопросы вычисления карты глубины сцены на основе модифицированного метода Depth Transfer. Предложенный подход основан на поиске похожих изображений в базе данных, с помощью которых формируется карта глубины, с последующей ее постобработкой для уменьшения погрешности преобразования изображений из 2D в 3D.*

\* Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг.