

УДК 621.396.33

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЗАГЛУБЛЕННОГО ОБЪЕКТА, С УЧЕТОМ СВОЙСТВ УКРЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Д.В. ДЕМЬЯНИУК¹, К.Н. ЧУГАЙ², Е.С. МАКСИМОВИЧ³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

²Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь, Республика Беларусь

³Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 3 марта 2018

Аннотация. В статье рассмотрены факторы, оказывающие влияние на распространение электромагнитной энергии в укрывающих средах, а также модель сигнала, отраженного от заглубленного объекта, которая позволяет учесть существующие закономерности и особенности формирования радиолокационного изображения.

Ключевые слова: заглубленные объекты, модель отраженного сигнала, глубинный портрет, граница раздела сред.

Abstract. The factors which has an effect on distribution of electromagnetic energy in concealing surface and model of signal that reflected from subsurface object which allows to take into account existing patterns and features of radar image formation were examined in the article.

Keywords: subsurface objects, reflected signal model, deep portrait, border from dividing surface.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 114, No. 4, pp. 37-44
Simulation model of signal reflected from subsurface object
given the properties of concealing surface
D.V. Demyaniuk, K.N. Chugai, Ye.S. Maksimovitch

Введение

В последние годы значительно возрос интерес к дистанционным методам исследования природной среды, в том числе к такому перспективному и новому направлению, как подповерхностная радиолокация. Данное направление становится все более востребованным при проведении поисково-криминалистических мероприятий, разминировании местности, при строительстве объектов различного назначения, поиске полезных ископаемых и т. д., что требует исследования верхнего слоя земли (укрывающей среды). При этом объектами поиска являются трубы, взрывные устройства, клады, оружие и т. п. В качестве укрывающих сред могут быть грунт, растительность, снег, строительные конструкции [1].

Радиолокационные методы позволяют не только обнаруживать скрытые в глубине объекты, определять их параметры и расстояние до них, но и получать некоторые структурные и электрические характеристики сред. Решение задачи определения электрических свойств играет ключевую роль для достоверного восстановления толщины слоя и глубины залегания объекта. Следовательно, корректная и оперативная оценка электрофизических свойств грунта, а также адаптация к их изменению является актуальной задачей.

Подповерхностная радиолокация имеет ряд специфических отличий от традиционной радиолокации, решающей задачи наблюдения за воздушными (наземными, надводными) объектами, которые выражаются в следующем:

- дальности обнаружения в атмосфере существенно больше дальности обнаружения в грунте;
- величина ослабления электромагнитной волны в грунте существенно больше, чем в атмосфере (в атмосфере – доли дБ/км, в грунте – десятки дБ/м);
- скорость распространения электромагнитной волны в грунте существенно меньше, чем в атмосфере, при одинаковой частоте зондирующего сигнала;
- антенная система в подповерхностной радиолокации работает в ближней зоне, поле, формируемое в среде вблизи апертуры, учитывая модель антенны, можно представить в виде «пятна» округлой формы, в отличие от антенных систем, используемых в традиционной радиолокации, где сканирование осуществляется полностью сформированной диаграммой направленности;
- электромагнитная волна при прохождении в грунте претерпевает существенные дисперсионные искажения из-за частотной зависимости скорости распространения (показателя преломления) в грунте и изменчивости его профиля с глубиной [2].

Отличительной особенностью приповерхностного слоя укрывающей среды, как правило, является слоистость, причем отдельные слои имеют значительные отличия по физическим свойствам и, как следствие, по электрическим характеристикам. Электрические характеристики подстилающей поверхности в значительной степени зависят от влажности, минерализации, посторонних примесей и частоты, причем влажность является одним из факторов, их определяющих. Результаты исследований электрических характеристик песка и глины в диапазоне 0,1–10 ГГц представлены в [3]. Как показали исследования, с увеличением частоты уменьшается коэффициент отражения по мощности от границы раздела «воздух-грунт».

Распространение ЭМВ в укрывающей среде

Коэффициент отражения по мощности в случае вертикального облучения и неферромагнитной укрывающей среды (земля, вода, снег и т.д.) может быть определен в соответствии с выражением [2–5]

$$R_{P_{k+1}} = \left[\frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_k} - \sqrt{\dot{\epsilon}_{k+1}}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_k} + \sqrt{\dot{\epsilon}_{k+1}}} \right]^2, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_k$ – комплексная диэлектрическая проницаемость k -го слоя; $\dot{\epsilon}_{k+1}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость $(k+1)$ -го слоя.

Коэффициент прохождения по мощности (прозрачность) в случае вертикального облучения и неферромагнитной среды определяется выражением [2–5]

$$C_{P_{k+1}} = \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k+1}} \left[\frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}_k}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_k} + \sqrt{\dot{\epsilon}_{k+1}}} \right]^2}{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_k}}. \quad (2)$$

Причем $R_{P_{k+1}} + C_{P_{k+1}} = 1$. Скорость распространения электромагнитной волны в k -м слое среды [2]:

$$V_k = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_k}}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в среде.

Будем считать, что характеристики рассматриваемой системы соответствуют устройству подповерхностного зондирования [2], а облучаемый участок в общем виде представляет собой «пятно» круглой формы радиусом r_{rs} :

$$r_{rs} = r_s \tan \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right), \quad (4)$$

и площадью $S_s = \pi r_{rs}^2$, где r_s – высота подъема фазового центра антенны над границей укрывающей среды; $\Delta\theta = \sqrt{\frac{4\pi}{G_r}}$ – разрешающая способность по угловым координатам;

G_r – коэффициент усиления приемной антенны; S_s – площадь облучаемого участка поверхности.

Учитывая выбранный вариант реализации устройства подповерхностного зондирования [2], на рис. 1 приведена схема радиолокационного наблюдения заглубленного объекта.

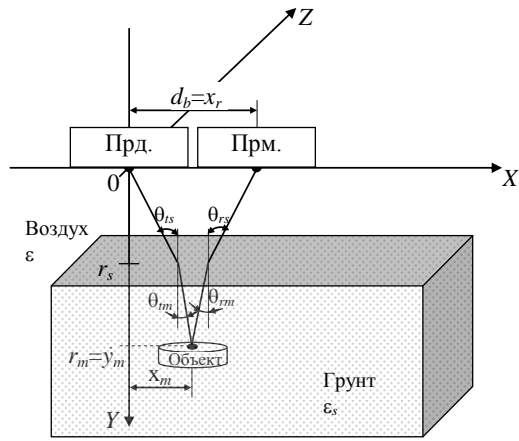


Рис. 1. Схема радиолокационного наблюдения заглубленного объекта: координаты фазового центра передающей антенны – $(x_t = 0, y_t = 0, z_t = 0)$; координаты фазового центра приемной антенны – $(x_r = d_b, y_r = 0, z_r = 0)$; координаты центра верхней поверхности заглубленного объекта – $(x_m, y_m = r_m, z_m)$; высота фазового центра передающей антенны над уровнем земли – r_s

При прохождении границы раздела «воздух-грунт» для антенн, приподнятых над землей, наблюдается сужение формируемого полем антенны «пятна». Результаты, характеризующие изменение электрического и магнитного полей в зависимости от изменения высоты подъема фазового центра антенны над грунтом (песком, при $\varepsilon = 3,2 - 3,6$), показаны на рис. 3 и 4 для антенны, представленной на рис. 2.

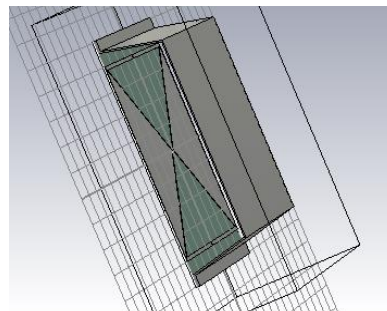


Рис. 2. Обобщенный вид антенны

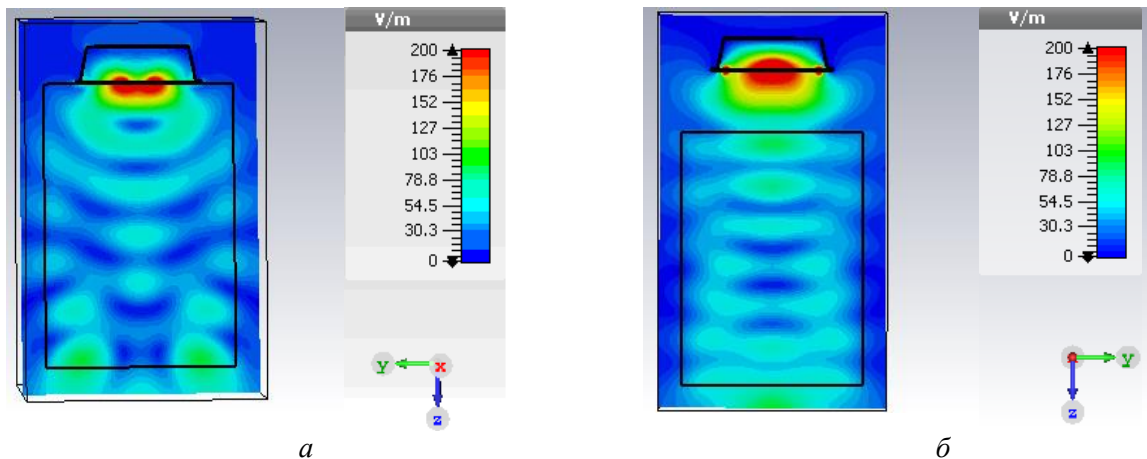


Рис. 3. Распределение электрического поля в грунте на частоте 1,5 ГГц:
a – при $r_s = 0,0$ м; *б* – при $r_s = 0,1$ м

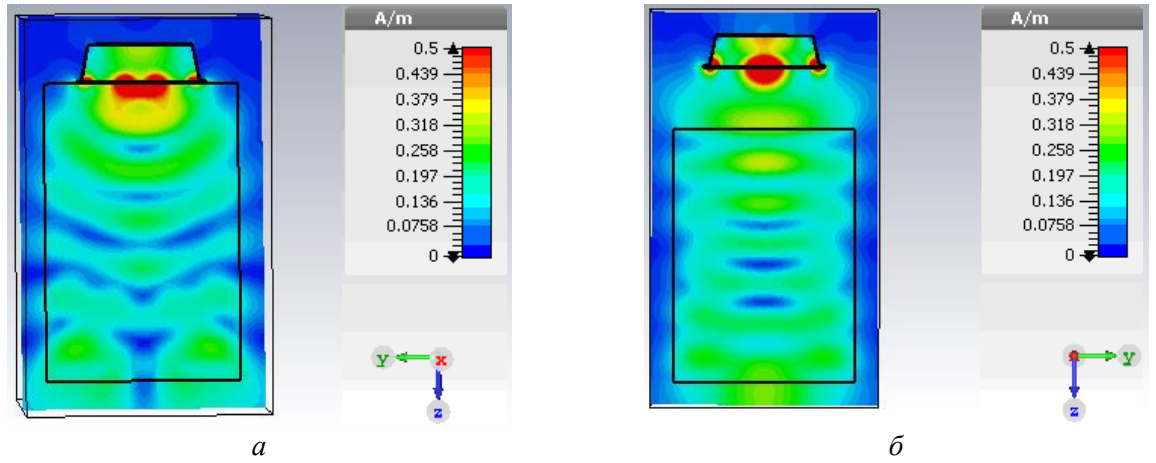


Рис. 4. Распределение магнитного поля в грунте на частоте 1,5 ГГц:
 а – при $r_s = 0,0$ м; б – при $r_s = 0,1$ м

В обобщенном виде сужение формируемого полем антенны «пятна» при прохождении границы раздела «воздух-грунт» можно оценить через характер изменения его радиуса с r_{rs} в воздухе до \tilde{r}_{rs} в грунте, а отношение r_{rs} к \tilde{r}_{rs} рассчитывается в соответствии с выражением [3]

$$\frac{r_{rs}}{\tilde{r}_{rs}} = \frac{\frac{r_s}{2r_m} + 1}{\frac{r_s}{2r_m} + \frac{\operatorname{tg}\theta_m}{\operatorname{tg}\theta_{is}}} \quad (5)$$

Сужение формируемого антенной поля в среде способствует перераспределению энергии излучения в сторону увеличения плотности потока мощности. Выражение, характеризующее данный эффект для заданной высоты подъема фазового центра антенны над границей укрывающей среды r_s и глубины нахождения заглубленного объекта r_m , имеет вид [4]:

$$K_F = \left(\frac{\frac{r_s}{2r_m} + 1}{\frac{r_s}{2r_m} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_k}}} \right)^2 \quad (6)$$

В случае когда $\frac{r_s}{r_m} \gg 2$, фокусирующим действием можно пренебречь. В то же время максимум коэффициента, характеризующего эффект фокусировки, стремится к ϵ_k ($K_F \cong \epsilon_k$), что наблюдается только для широких слоев (при малой глубине нахождения объекта) укрывающей среды и малых высот подъема фазового центра антенны над границей укрывающей среды.

Математическая модель сигнала, отраженного от заглубленного объекта

Отраженный сигнал во временной области представляет собой сумму элементарных отраженных сигналов от отдельных элементарных участков, характеризующих обнаруживаемый заглубленный объект, комплексные амплитуды которых становятся функциями времени [3, 9].

В результате отраженный от отдельных элементарных участков заглубленного объекта сигнал можно представить в виде выражения [6, 7]

$$m(t) = \sum_g E_{mg}(t) e^{i\varphi_{mg}(t)} U_0(t - t_{r_g}) e^{i\omega_0 t}, \quad (7)$$

где $E_{mg}(t)$, $\varphi_{mg}(t)$ – амплитуды и фазы; t_{r_g} – время запаздывания сигнала, отраженного от g -го элементарного участка заглубленного объекта, относительно зондирующего.

Как известно [3, 5], при радиозондировании скрытых объектов основным отражающим элементом являются участки соприкосновения, образующиеся на границе между укрывающей средой и объектом. Данная особенность позволяет рассматривать эффективную отражающую поверхность объекта, как отражение от границы «воздух-грунт» для g -го элементарного участка заглубленного объекта всей его площади:

$$\sigma_{mg} = S_{mg} R_{pm}, \quad (8)$$

где S_{mg} – отражающая площадь g -го элементарного участка заглубленного объекта;
 R_{pm} – коэффициент отражения по мощности для границы «воздух-грунт».

Как показывают результаты экспериментальных исследований [2, 6, 8], наиболее интенсивные отражения для заглубленного объекта, форма которого наиболее приближена к цилиндрической или кубической, обусловлены отражениями от верхнего и нижнего участков соприкосновения объекта с укрывающей средой.

Средняя мощность сигнала, отраженного от верхней поверхности g -го элементарного участка заглубленного объекта [2], с учетом эффекта фокусировки определяются в соответствии с выражением

$$\sigma_{mg}^2(t) = \frac{P_0 G_t G_r \lambda_{\text{вд}}^2 \sigma_{mg}}{(4\pi)^3 r_{mg}^2(t) r_{rmg}^2(t) \alpha_s [r_{mg}(t) - r_{isg}(t) + r_{rmg}(t) - r_{rsg}(t)]} K_F, \quad (9)$$

где σ_{mg} – эффективная отражающая поверхность g -го элементарного участка заглубленного объекта;
 α_s – коэффициент затухания грунта;

$$r_{mg}(t) = \sqrt{[x_{mg}(t) - x_t(t)]^2 + [y_{mg}(t) - y_t(t)]^2 + [z_{mg}(t) - z_t(t)]^2}; \quad r_{isg}(t) = \frac{r_s(t)r_{mg}(t)}{y_{mg}(t)};$$

$$r_{rmg}(t) = \sqrt{[x_{mg}(t) - x_r(t)]^2 + [y_{mg}(t) - y_r(t)]^2 + [z_{mg}(t) - z_r(t)]^2}; \quad r_{rsg}(t) = \frac{r_s(t)r_{rmg}(t)}{y_{mg}(t)};$$

K_F – коэффициент, характеризующий эффект фокусировки в укрывающей среде (грунте).

Рассматривая объект, в не металлическом исполнении, следует учитывать сигнал, отраженный от нижней поверхности заглубленного объекта. При этом средняя мощность сигнала, отраженного от нижней поверхности g -го элементарного участка заглубленного объекта [2], с учетом эффекта фокусировки равна

$$\sigma_{bg}^2(t) = \frac{P_0 G_t G_r \lambda_{\text{вд}}^2 \sigma_{mg}}{(4\pi)^3 r_{ibg}^2(t) r_{rbg}^2(t) \alpha_s [r_{ibg}(t) - r_{isbg}(t) + r_{rbg}(t) - r_{rsbg}(t)]} \times \frac{1 - R_{pm}}{\alpha_m [r_{ibg}(t) - r_{img}(t) + r_{rbg}(t) - r_{rmg}(t)]} K_{Fm}, \quad (10)$$

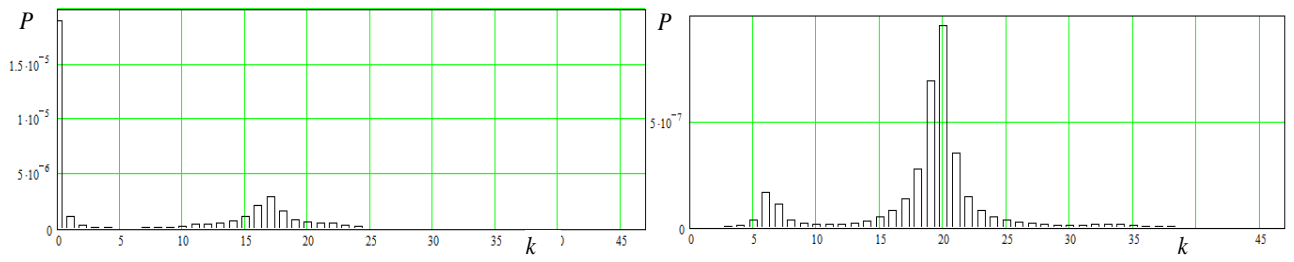
$$\text{где} \quad r_{ibg}(t) = \sqrt{[x_{mg}(t) - x_t(t)]^2 + [y_{mg}(t) + h_m - y_t(t)]^2 + [z_{mg}(t) - z_t(t)]^2}; \quad r_{isbg}(t) = \frac{r_s(t)r_{ibg}(t)}{y_{mg}(t) + h_m};$$

$$r_{rbg}(t) = \sqrt{[x_{mg}(t) - x_r(t)]^2 + [y_{mg}(t) + h_m - y_r(t)]^2 + [z_{mg}(t) - z_r(t)]^2}; \quad r_{img}(t) = \frac{y_{mg}(t)r_{ibg}(t)}{y_{mg}(t) + h_m};$$

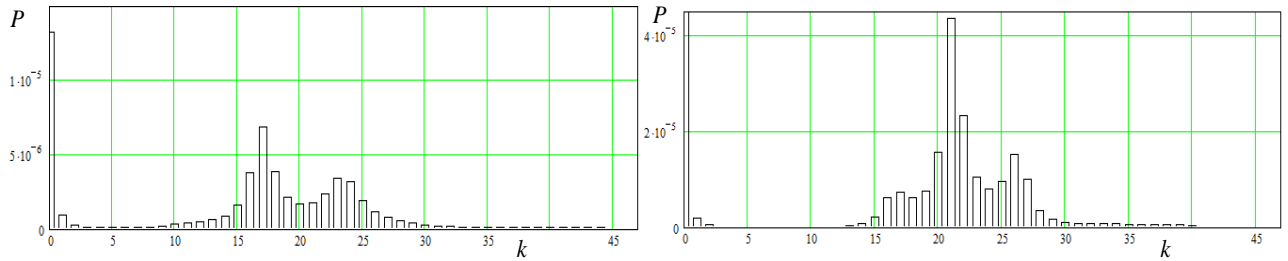
$$r_{rsbg}(t) = \frac{r_s(t)r_{rbg}(t)}{y_{mg}(t) + h_m}; \quad r_{rmg}(t) = \frac{y_{mg}(t)r_{rbg}(t)}{y_{mg}(t) + h_m}; \quad h_m \text{ – толщина заглубленного объекта;}$$

α_m – коэффициент затухания, зависящий от физико-химических свойств заглубленного объекта;
 K_{Fm} – коэффициент, характеризующий эффект фокусировки в укрывающей среде (грунте), с учетом характеристик наблюдаемого заглубленного объекта.

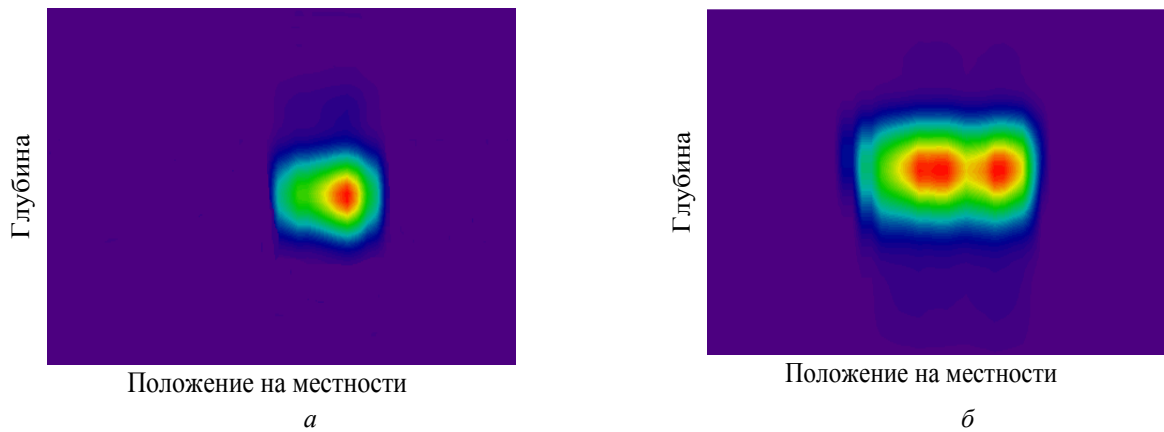
Радиолокационные портреты (по результатам моделирования и экспериментов) отраженных от заглубленных объектов сигналов (противопехотная мина (типа ПМН-2) и противотанковая мина (типа ТМ-62)) и укрывающей среды, полученные для одноименных условий ($P_0 = 50$ мВт, $\lambda_{\text{ср}} = 0,2$ м, $\Delta f_M = 1$ ГГц, $T_0 = 10,23$ мкс, $\varepsilon_s = 5$, $r_s \approx 0,3$ м, $r_m \approx 0,34$ м) с учетом алгоритмов обработки сигналов на выходе смесителя, приведенных в [9], представлены на рис. 4–7.



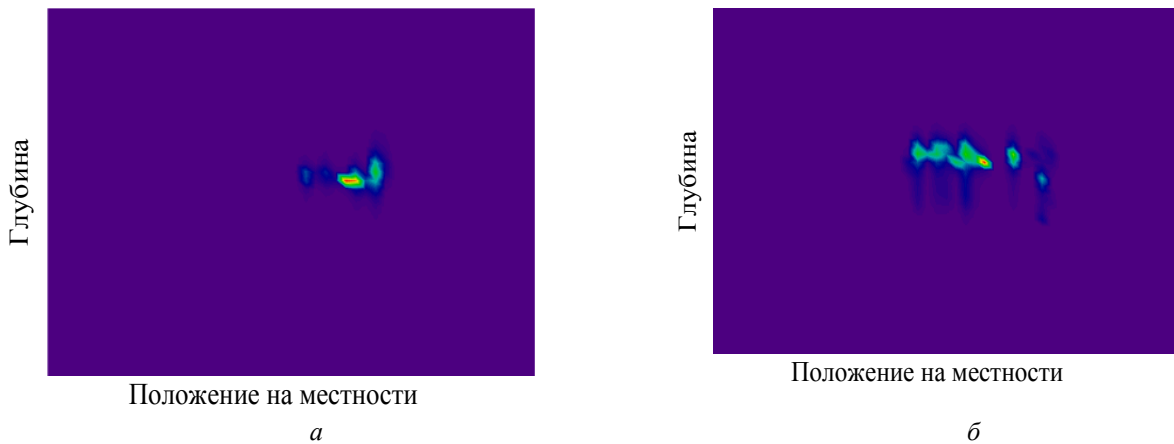
a *б*
 Рис. 4. Глубинный портрет противопехотной мины:
a – результат моделирования; *б* – результат эксперимента



a *б*
 Рис. 5. Глубинный портрет противотанковой мины:
a – результат моделирования; *б* – результат эксперимента



a *б*
 Рис. 6. Преобразование Фурье по экспериментальным данным:
a – противопехотная мина; *б* – противотанковая мина



a *б*
 Рис. 7. Радиолокационное изображение по экспериментальным данным:
a – противопехотная мина; *б* – противотанковая мина

Заключение

Специфика формирования отраженного сигнала в подповерхностной радиолокации обусловлена

резким изменением диэлектрической проницаемости на границе раздела сред, что существенно усложняет условия наблюдения, особенно в случае многослойной укрывающей среды. Сопоставляя результаты экспериментальных исследований и моделирования, полученные для одинаковых условий, несмотря на высокую степень адекватности созданной имитационной модели сигнала, отраженного от заглубленного объекта, существуют и отличия, которые, в первую очередь, обусловлены сложной интерференционной картиной и наличием достаточно мощного просачивающегося сигнала от передатчика в приемный тракт.

В результате созданная модель позволяет решить задачу настройки и калибровки существующих подповерхностных радиолокаторов с минимальными временными затратами, а также обеспечить синтез высокоэффективных подповерхностных радиолокаторов, способных обеспечить решение задач формирования радиолокационных изображений наблюдаемых объектов в реальном масштабе времени для высококомобильных устройств, как в ручном варианте, так и в варианте, устанавливаемом на роботизированные платформы.

Список литературы

1. Проблематика построения радиолокатора подповерхностного зондирования / С.А. Савенко [и др.] // Наука и воен. безопасность. 2013. № 3. С. 20–27.
2. Чугай К.Н., Савенко С.А. Имитационное моделирование отраженных сигналов в подповерхностной радиолокации // Наука и воен. безопасность. 2016. № 1. С. 39–43.
3. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Филькенштейн [и др.]. М.: Недра, 1986. 128 с.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации / А.Ю. Гринев [и др.]; под общ. ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
5. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн [и др.]. М.: Сов. радио, 1977. 176 с.
6. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М.: Воеиздат, 1983. Ч. 1. 456 с.
7. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я.Д. Ширман [и др.]. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
8. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range Fm Radar. Horwood.: Artech House Publishers, 2003. 314 p.
9. Чугай К.Н., Савенко С.А. Современный подход к обработке сложных сигналов в системе подповерхностного зондирования // Наука и воен. безопасность. 2015. № 1. С. 39–43.

References

1. Problematika postroenija radiolokatora podpoverhnostnogo zondirovanija / S.A. Savenko [i dr.] // Nauka i voen. bezopasnost'. 2013. № 3. S. 20–27. (in Russ.)
2. Chugaj K.N., Savenko S.A. Imitacionnoe modelirovanie otrazhennyh signalov v podpoverhnostnoj radiolokacii // Nauka i voen. bezopasnost'. 2016. № 1. S. 39–43. (in Russ.)
3. Primenenie radiolokacionnogo podpoverhnostnogo zondirovanija v inzhenernoj geologii / M.I. Fil'kenshtejn [i dr.]. M.: Nedra, 1986. 128 s. (in Russ.)
4. Voprosy podpoverhnostnoj radiolokacii / A.Ju. Grinev [i dr.]; pod obshh. red. A.Ju. Grineva. M.: Radiotehnika, 2005. 416 s. (in Russ.)
5. Radiolokacija sloistyh zemnyh pokrovov / M.I. Finkel'shtejn [i dr.]. M.: Sov. radio, 1977. 176 s. (in Russ.)
6. Ohrimenko A.E. Osnovy radiolokacii i radiojelektronnaja bor'ba. M.: Voeizdat, 1983. Ch. 1. 456 s. (in Russ.)
7. Radiojelektronnye sistemy: osnovy postroenija i teorija: spravochnik / Ja.D. Shirman [i dr.]. M.: Radiotehnika, 2007. 512 s. (in Russ.)
8. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range Fm Radar. Horwood.: Artech House Publishers, 2003. 314 p. (in Russ.)
9. Chugaj K.N., Savenko S.A. Sovremennyj podhod k obrabotke slozhnyh signalov v sisteme podpoverhnostnogo zondirovanija // Nauka i voen. bezopasnost'. 2015. № 1. S. 39–43. (in Russ.)

Сведения об авторах

Демьянюк Д.В., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Demjanjuk D.V., PG student of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Чугай К.Н., к.т.н., доцент, докторант Научно-исследовательского института Вооруженных Сил Республики Беларусь.

Максимович Е.С., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-705-64-28;
e-mail: dmitry.demyaniuk@gmail.com
Демьянюк Дмитрий Валентинович

Chugai K.N., PhD, associate professor, doctoral student of the Scientific Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus.

Maksimovitch Ye.S., PhD, associate professor, leading researcher of the Institute of applied physics of the National Academy of Sciences of Belarus.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-29-705-64-28;
e-mail: dmitry.demyaniuk@gmail.com
Demyaniuk Dmitry Valentinovich