

УДК 621.396.969

Н.А. КОВАЛЕНКО, аспирант, УИПА, Харьков,
В.Д. САХАЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., УИПА, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСКАЖЕНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ЗА НЕПРОЗРАЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ

На примере трехслойной модели человека в завале проведено исследование зависимости амплитуды и искажения отраженного сигнала для различных форм зондирующего импульса. Показано, что наибольшую амплитуду имеет отраженный зондирующий сигнал в виде гауссова моноцикла. Ил.: 7. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: трехслойная модель, искажение отраженного сигнала, зондирующий импульс, моноцикл.

Постановка проблемы. В последнее время в литературе описывается много приборов обнаружения и диагностики биологических объектов, основанных на использовании сверхширокополосных (СШП) сигналов. Подробный обзор работ, посвященных поиску людей в завалах и за непрозрачными преградами, а также работ по медицинской диагностике человека приведен в [1]. Несмотря на бурное развитие данной темы в научном мире, дальность действия приборов радиолокационного поиска людей не превышает десяти метров. В большинстве случаев используются подповерхностные радиолокаторы со специфическими системами обработки отраженного сигнала, направленной на обнаружение вибрации грудной клетки и сердечной мышцы человека за преградой. Для целей биорадиолокации рекомендуется использовать зондирующие сигналы с центральными частотами в диапазоне 1 – 10 ГГц [2].

В работе [3] были получены частотные зависимости коэффициента отражения для трехслойной структуры "кирпич-человек-грунт" от толщины слоя кирпича с учетом дисперсионных свойств человека, строительного материала, под которым находится человек, и грунта. Это дало возможность определить рабочий диапазон частот для систем поиска людей в завалах строительных конструкций, при котором амплитуда отраженного излучения будет максимальной.

Анализ литературных источников. В настоящее время для целей биорадиолокации человека используются различные виды СШП

© Н.А. Коваленко, В.Д. Сахацкий, 2013

сигналов. В работе [4] предлагается использовать в качестве зондирующих сигналы $s_1(t)$, $s_2(t)$, представленные на рис. 1.а и рис. 1.б. В [5] предлагается использовать в качестве зондирующего сигнала радиоимпульс $s_3(t)$ (рис. 1.в) либо СШП сигнал $s_1(t)$, представленный на рис. 1.а. В [6] в качестве зондирующего сигнала предлагается использовать гауссов моноцикл $s_4(t)$ (рис. 1.г). Для переносных радиолокаторов с разрешением по дальности $\Delta R \leq 0,3 - 0,5$ м необходимо использовать зондирующие импульсы длительностью менее 2 – 3 нс и шириной спектра более 300 – 500 МГц [7]. Преимущества использования того или иного вида СШП сигнала для целей биорадиолокации остается малоизученным.

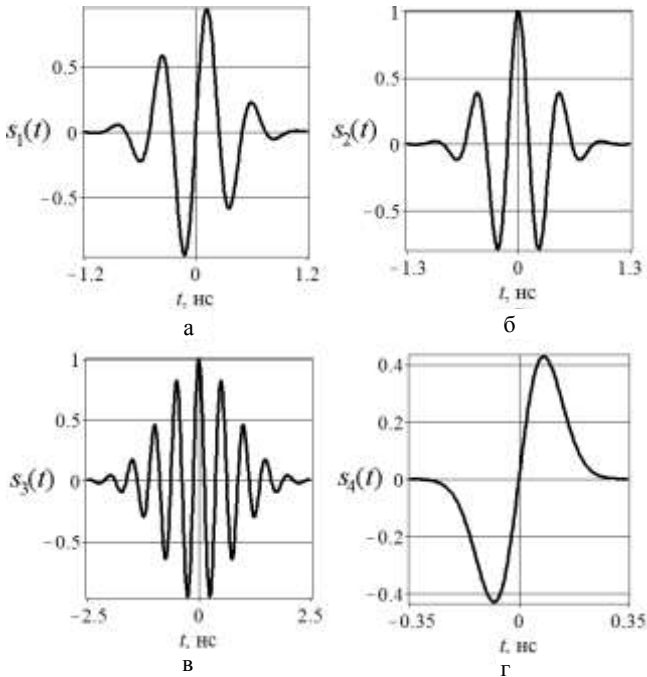


Рис. 1. Виды зондирующих сигналов, применяемых в системах биорадиолокации

Классическим методом решения задач распространения короткоимпульсных излучений в различных средах является метод одномерного преобразования Фурье (ОПФ). Основным недостатком данного метода является отсутствие в функции спектральной плотности

информации о положении соответствующих частотных составляющих на временной оси [7], что существенно для задач спектрального анализа. В задачах распространения короткоимпульсных излучений анализу подлежит обратное преобразование Фурье, которое описывает временную зависимость распространяющегося сигнала и характеризует его форму. Так, метод ОПФ широко используют при исследовании искажения формы СШП сигнала в процессе распространения в плазменных средах [8] и при исследовании формы излученного импульса апертурными антеннами [9, 10]. Численный расчет полученных интегральных преобразований может осуществляться, например, с использованием алгоритма дискретного быстрого преобразования Фурье (ДБПФ) с применением спектральных "окон" Хана, Хемминга и Барлетта [11]. В работе [12] отмечается, что, если спектр сигнала относительно гладок, то при вычислении данных интегральных преобразований "окна" можно вообще не применять.

Целью работы является определение вида и параметров зондирующего сигнала, который при отражении от человека, находящегося под слоем кирпича, имеет максимальную амплитуду и минимальные искажения.

Основная часть. В СВЧ диапазоне при решении задач дифракции моделью человека может служить эллипсоид, цилиндр либо плоская структура [13, 14]. Предполагаем, что моделью человека служит плоский слой толщиной b . Человек лежит непосредственно на полубесконечном грунте и над ним находится слой строительного материала толщиной a с электрофизическими параметрами красного кирпича (рис. 2). Считаем, что электрофизические параметры человека соответствуют электрофизическим параметрам его мышечной ткани. На рис 2 ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость свободного пространства равная 1; ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 – комплексные относительные диэлектрические проницаемости соответствующих слоев; k_0 – волновое число в свободном пространстве; k_1 , k_2 и k_3 – соответствующее каждому слою волновое число.

Частотная зависимость коэффициента отражения от человека для приведенной структуры описана в [3]. В работе показано, что при размещении приемной антенны в свободном пространстве из-за сильного отражения СШП излучения от поверхности завала среднее значение коэффициента отражения практически одинаково как при наличии в завале человека, так и при его отсутствии. Поэтому для фиксации отраженного излучения необходимо принимать специальные меры. В

случае размещения приемной антенны непосредственно на поверхности завала на частотах 1 – 6 ГГц различие между коэффициентом отражения при наличии человека и при его отсутствии становится существенным.

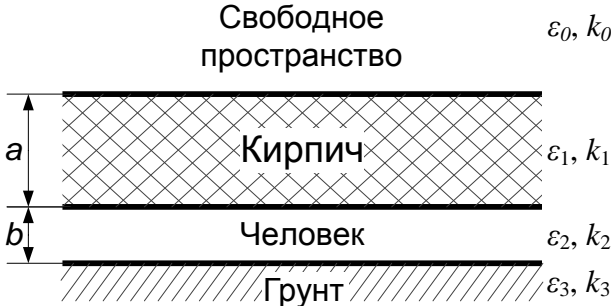


Рис. 2. Трехслойное полупространство в разрезе

Увеличение относительной влажности слоя кирпича приводит к сужению рабочего диапазона частот, при котором уровень отраженного сигнала остается высоким, до 1 – 2 ГГц. В работе [15] по результатам экспериментальных исследований рекомендуют использовать для целей биорадиолокации диапазон частот в пределах 1,6 – 2 ГГц. Исходя из вышесказанного, является целесообразным исследовать искажение формы зондирующего сигнала в данном диапазоне центральных частот для случая, когда приемная антенна (точка наблюдения) расположена непосредственно на поверхности кирпичного слоя.

Исследуемые сигналы, приведенные на рис. 1.а – 1.г, соответственно можно представить следующими математическими моделями [4 – 6]:

$$s_1(t) = A e^{-\frac{\pi t^2}{\tau^2}} \cos(2\pi f_0 t); \quad (1)$$

$$s_2(t) = A \cdot e^{-\Delta f^2 t^2} \cos \left(2\pi f_0 t - e^{\frac{1(2\pi f_0)^2}{4 \Delta f^2}} \right); \quad (2)$$

$$s_3(t) = A \cdot e^{-\Delta f^2 t^2} \sin(2\pi f_0 t); \quad (3)$$

$$s_4(t) = \frac{A \cdot t \cdot e^{-\frac{t^2}{\tau^2}}}{\tau}, \quad (4)$$

где f_0 – центральная частота спектра СШП-сигнала; $\Delta f = f_B - f_H$, а f_B и f_H – соответственно верхняя и нижняя частоты спектра; τ – время спада моноцикла.

Форма отраженного от человека СШП-сигнала при расположении точки приема на поверхности кирпичного слоя определялась при помощи методов прямого и обратного преобразования Фурье [7]. Для модели исходного зондирующего сигнала $s_i(t)$, где индекс i соответствует индексу сигнала в уравнениях (1) – (4), вычислялся спектр сигнала $C_i(f)$ при помощи прямого преобразования Фурье

$$C_i(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_i(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (5)$$

Спектры сигналов $C_1(f) - C_4(f)$, соответствующие сигналам $s_1(t) - s_4(t)$, показаны на рис. 3.

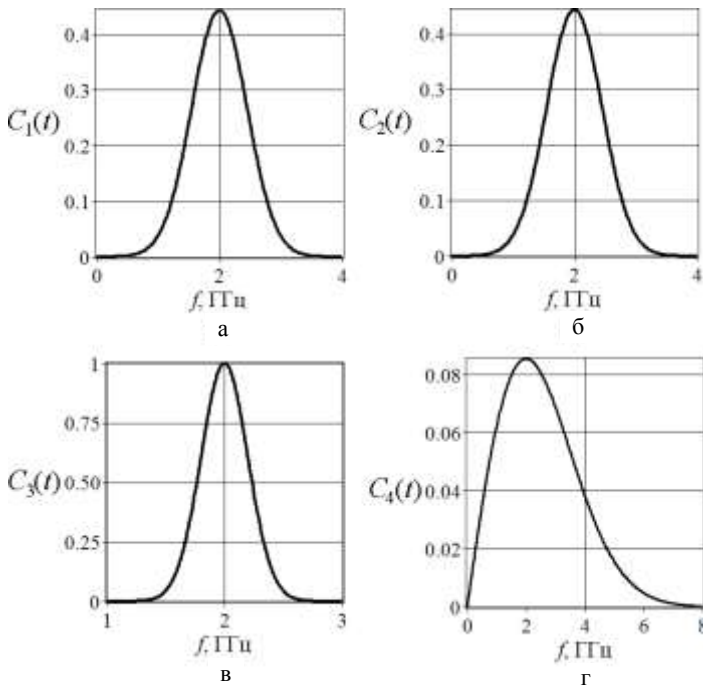


Рис. 3. Спектры зондирующих сигналов, представленных на рис. 1

Используя приведенный в [3] коэффициент отражения $R(f)$ зондирующего сигнала от рассматриваемой трехслойной структуры определяется спектр отраженного сигнала:

$$SC_i(f) = R(f) \cdot C_i(f), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (6)$$

где $R(f) = \frac{t_1(r_2 + r_3 e^{j2k_2 b}) e^{j2k_1 a}}{D}$;

$$D = 1 + r_2 r_3 e^{j2k_2 b} + r_1 (r_2 + r_3 e^{j2k_2 b}) e^{j2k_1 a};$$

$$t_i = \frac{2k_{i-1}}{k_{i-1} + k_i} - \text{коэффициент прохождения для } i\text{-го слоя};$$

$$r_i = \frac{k_0 - k_i}{k_0 + k_i} - \text{коэффициент отражения от } i\text{-го слоя};$$

ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость i -го слоя;

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число в свободном пространстве};$$

$$k_i = \frac{1}{15} \pi f \sqrt{\varepsilon_i} - \text{волновое число в } i\text{-м слое}.$$

Здесь частота f определяется в ГГц, а λ – в см.

Относительные диэлектрические проницаемости каждого слоя описываются следующими выражениями [3]:

$$\varepsilon_1 = 4,5 + j0,5;$$

$$\varepsilon_2 = (53,440 + 0,131f^2 - 2,663f) + j(1,382 + 0,079f^2 + 0,119f);$$

$$\varepsilon_3 = (0,004f^2 - 0,095f + 3,864) + j(0,006f^2 - 0,087f + 0,037).$$

ε_1 соответствует относительной влажности кирпича 4,3%.

Данные зависимости являются аппроксимацией экспериментально полученных значений в исследуемом диапазоне частот. Форма отраженного сигнала находилась посредством обратного преобразования Фурье:

$$S_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} SC_i(f) \cdot e^{j2\pi ft} df. \quad (7)$$

Численное моделирование формы отраженных сигналов проведено в компьютерной системе аналитических вычислений Maple [16]. Значение коэффициента A для сигналов $s_1(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$, $s_4(t)$ выбиралось равным 1 В/м. Все зондирующие импульсы имели центральную частоту f_0 , равную 2 ГГц. Коэффициент широкополосности η [17] для сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ равен 0,68, для радиоимпульса $s_3(t)$ – 0,3, а для сигнала $s_4(t)$ – 1,67.

При численных расчетах во внимание принималось, то обстоятельство, что форма записи коэффициента отражения в виде (6) соответствует временной зависимости гармонического поля, определяемой показателем $e^{-j\omega t}$, т.е. она справедлива для положительной области частот. В отрицательной области частот этот показатель соответствует $e^{+j\omega t}$. Для такой временной зависимости поля комплексную диэлектрическую проницаемость необходимо записывать в виде комплексно-сопряженного выражения [18]. Значения реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для положительных и отрицательных частот соответствовали друг другу.

Правомерность использования комплексно-сопряженных выражений при вычислении интеграла вида (7) проверялась на задаче о прохождении короткоимпульсного излучения гауссовой формы в слой грунта. Решение данной задачи, проведенное иным методом, представлено в [13]. Подставляя в интеграл (7) вместо $C_i(f)$ приведенную в [13] передаточную функцию и те же самые параметры грунта и зондирующего сигнала $s_i(t)$, получено, что для произвольно выбранной глубины грунта, равной 1 м, результаты расчета формы прошедшего в грунт импульса с помощью выражения (7) и в работе [13] полностью совпадают.

Результаты расчетов для зондирующих импульсов $s_1(t)$, $s_2(t)$ и $s_3(t)$ приведены на рис. 4 – рис. 6 соответственно. Из рисунков видно, что отражение этих сигналов изменяет свою форму уже при толщине кирпичного слоя 100 см, а при толщине 200 см и более форма сигнала полностью искажается. Это объясняется тем, что спектр этих зондирующих импульсов расположен в высокочастотной области (рис. 3.а – рис. 3.в), в которой имеет место сильное поглощение спектральных составляющих и коэффициент отражения для них очень мал.

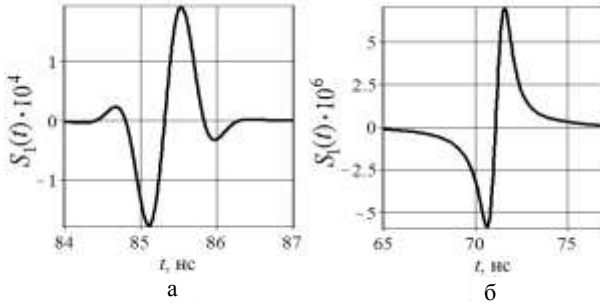


Рис. 4. Форма отраженного сигнала для зондирующего импульса $s_1(t)$:
 а – $a = 100$ см; б – $a = 200$ см

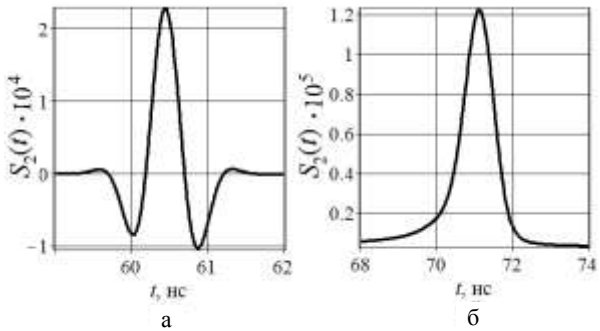


Рис. 5. Форма отраженного сигнала для зондирующего импульса $s_2(t)$:
 а – $a = 100$ см; б – $a = 200$ см.

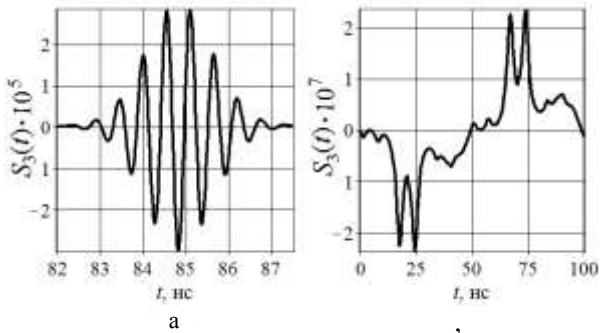


Рис. 6. Форма отраженного сигнала для зондирующего импульса $s_3(t)$:
 а – $a = 100$ см; б – $a = 200$ см

Спектр зондирующего импульса $s_4(t)$ занимает не только высокочастотную, но и низкочастотную области (рис. 3.г). Поэтому затухание импульса в процессе распространения происходит в меньшей степени.

Форма отраженного импульса $S_4(t)$ показана на рис. 7.

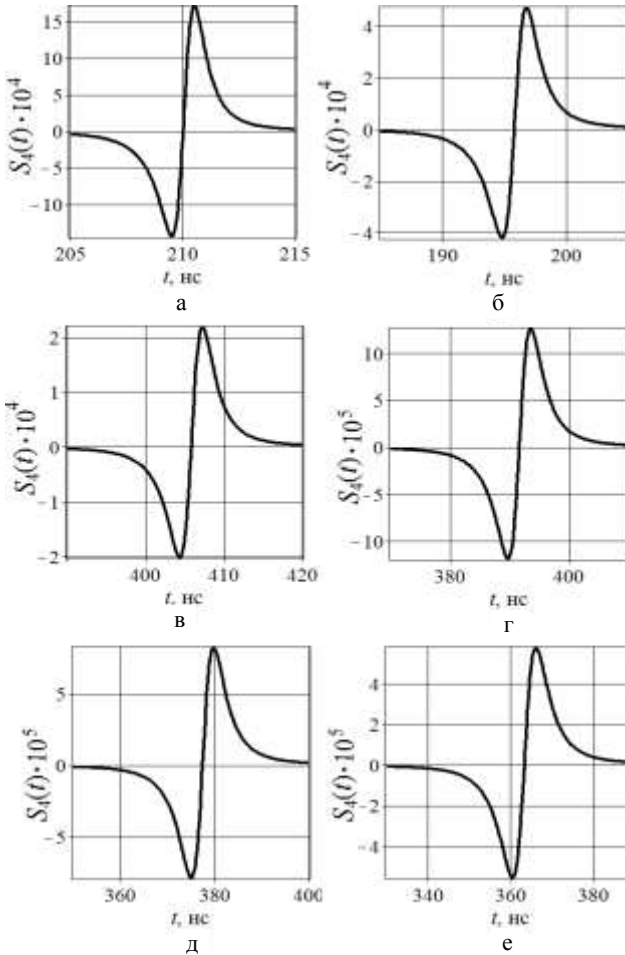


Рис. 7. Форма отраженного сигнала для зондирующего импульса $s_4(t)$:

а – $a = 100$ см; б – $a = 200$ см; в – $a = 300$ см;
 г – $a = 400$ см; д – $a = 500$ см; е – $a = 600$ см.

Видно, что его длительность увеличивается, но двух лепестковый характер формы импульса сохраняется не только при толщине кирпичного слоя равного 100 см, но и в несколько раз превышающих эту толщину. При этом амплитуда отраженного импульса $S_4(t)$ намного больше амплитуды отраженных импульсов $S_1(t)$, $S_2(t)$ и $S_3(t)$.

Очевидно, что полученные результаты исследования в частном случае для человека можно распространить и на другие объекты, которые обладают высокими отражающими свойствами.

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что исследуемые зондирующие сигналы при отражении от человека (как хорошей проводящей среды) изменяют форму. Это приводит к увеличению длительности и некоторому смещению центральной частоты спектра отраженного сигнала в область низких частот. Расчеты показали, что с возрастанием влажности строительного материала эти эффекты усиливаются. Наибольшую амплитуду имеет отраженный зондирующий сигнал в виде гауссова моноцикла. Его форма искажается, но число лепестков, по которым можно идентифицировать этот вид сигнала, остается неизменным.

Перспективой дальнейших исследований является разработка математической модели для человека в виде цилиндра конечных размеров.

Список литературы: 1. *Абрамов А.В.* Биорадиолокация: монография / *А.В. Абрамов*; под ред. *А.С. Бугаева, С.И. Ивашова*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 396 с. 2. Обнаружение и дистанционная диагностика состояния людей за препятствиями с помощью РЛС: материал технической информации / *А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов* и др // Радиотехника. – 2003. – № 7. – С. 42-47. 3. *Коваленко Н.А.* Дифракция сверхширокополосного излучения на многослойных структурах / *Н.А. Коваленко, В.Д. Сахацкий* // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2012. – Вип. 3 (32). – С. 178–184. 4. *Бугаев А.С.* Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения: материал технической информации / *А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Чапурский* // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51. – № 10. – С. 1224–1239. 5. *Черняк В.С.* Оптимизация обнаружения неподвижных людей под завалами строительных конструкций с помощью СШП-радиолокатора / *В.С. Черняк* // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009 – № 1–2. – С. 58-72. 6. *Варяница-Рошупкина Л.А.* Дифракция видеоимпульсной электромагнитной волны на подповерхностных объектах / *Л.А. Варяница-Рошупкина, Г.П. Почанин* // Радиофизика и электроника. – 2006. – Том 11. – № 2. – С. 240–252. 7. *Лазоренко О.В.* Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение / *О.В. Лазоренко, М.Ф. Черногор* // Радиофизика и радиоастрономия, 2008. – Т. 13. – № 14. – С. 270–332. 8. *Будагян И.Ф.* Поведение сверхширокополосных импульсов на границе раздела с неоднородными и дисперсными средами / *И.Ф. Будагян, Г.Г. Щучкин* // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 52. – № 2. – С. 176–191. 9. *Зернов Н.В.* О решении нестационарных краевых задач электродинамики // ДАН СССР – 1951. – Т. 30. – № 1. – С. 33–35. 10. *Зернов Н.В.* Характеристики

направленности круглых апертурных антенн при излучении несинусоидальных сигналов / Н.В. Зернов, Я.И. Пустовой // Доповіді Нац. Академії наук України, 1995. – № 9. – С. 46–48. **11.** Лазоренко О.В. Дисперсионные искажения высокочастотных сверхширокополосных радиосигналов при распространении в ноосфере / О.В. Лазоренко, М.Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэродинамика. – 1977. – Т. 37. – № 6. – С. 80–90. **12.** Марил.-мк. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его применения / С.Л. Марил.-мк. – М.: Мир, 1990. – 584 с. **13.** Кинг Р. Антенны в материальных средах: В 2-х книгах. Кн.1. Пер. с англ. / Р. Кинг, Г. Смит. – М.: 1984. – 824 с. **14.** Вовшин Б.М. Процедуры обнаружения подвижных объектов за преградами / Б.М. Вовшин, А.Ю. Гринев, Д.В. Фадин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 1–2. – С. 83–94. **15.** Вязьмитинов И.В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами / И.В. Вязьмитинов [и др.] // Радиофизика и электроника. – 2007. – Том 12. – № 2. – С. 426–434. **16.** Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. – М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2011. – 800 с. **17.** Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности / И.Я. Иммореев // Радиотехника и электроника. – 2009. – № 1. – Т. 54. – С. 5–31. **18.** Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высш. школа, 1984 – 147 с.

Поступила в редакцию 20.03.2013

После доработки 27.06.2013

УДК 621.396.969

Математична модель спотворення зондуючих сигналів у системах контролю місцезнаходження людей за непрозорою перешкодою / Коваленко М.О., Сахаський В.Д. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 39 (1012). – С. 104 – 114.

На прикладі тришарової моделі людини в завалі проведено дослідження залежності амплітуди і спотворення відбитого сигналу для різних форм зондуючого імпульсу. Показано, що найбільшу амплітуду має відбитий зондуючий сигнал у вигляді гаусового моноциклу. Лл.: 7. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: тришарова модель, спотворення відбитого сигналу, зондуючий імпульс, моноцикл.

UDC 621.396.969

Mathematical model of distortion probing signals in the control systems of the people location over opaque barrier / Kovalenko N.A., Sahatsky V.D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2013. – №. 39 (1012). – P. 104 – 114.

On the example of a three-layer model of human rubble study the amplitude of the reflected signal and distortion for various forms of the probe pulse. Shown that the largest amplitude is reflected probe signal in the form of Gaussian monocycle. Figs.: 7. Refs.: 18 titles.

Keywords: a three-layer model, the distortion of the reflected signal, probe pulse, monocycle.