

УДК 621.396.969

Н.А. Коваленко, В.Д. Сахацкий

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ДИФРАКЦИЯ СВЕРШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

Проведено исследование процессов отражения и затухания плоских волн в диапазоне частот, соответствующих спектру применяемых на практике зондирующих сверширокополосных (СШП) сигналов для поиска людей в завалах. Учтены дисперсионные свойства строительного материала, под которым находится человек, а также человека и грунта. Показано, что при расположении приемной антенны в свободном пространстве сигнал, отраженный от человека, маскируется излучением, отраженным от поверхности кирпичного слоя, а при расположении приемной антенны на поверхности слоя строительного материала маскирующий эффект существенно снижается.

**Ключевые слова** зондирующий сигнал, дифракция, поиск человека за преградой, трехслойная структура, отражение сигнала, маскирующий эффект.

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время для поиска людей под завалами строительных конструкций, а также за оптически непрозрачными преградами широко используются СШП-радиолокаторы [1, 2]. В качестве зондирующего сигнала используют импульсные излучения, а также радиоимпульсы нано- и пикосекундной длительности. В различных типах биорадиолокаторов используют разную форму СШП сигналов, которые имеют разные центральные частоты и спектральный состав. В процессе распространения зондирующего сигнала через строительные конструкции и отражения от человека происходит его ослабление и искажение. Все это приводит к необходимости определения оптимального вида зондирующего СШП сигнала, который бы имел допустимые искажения и минимальное ослабление в точке расположения приемной антенны радиолокатора.

**Целью статьи** является определение диапазона центральных частот зондирующего СШП сигнала, при которых отраженный сигнал в наименьшей степени затухает в процессе распространения при поиске людей в завалах строительных конструкций с учетом их дисперсионных свойств.

**Анализ литературных источников.** В настоящее время широко развиваются методы и средства подповерхностной радиолокации для обнаружения различных технических объектов, расположенных в грунте, а также методы обнаружения и диагностики людей, находящихся в завалах или за стенами строительных конструкций. В работе [3] отмечается, что для фиксации колебаний грудной клетки при дыхании человека целесообразно использовать биорадиолокаторы, работающие в диапазоне от 1 ГГц до 10 ГГц. Описан датчик типа «БиоРаскан», с рабочей частотой, равной 1,6 ГГц. При попытке использования частотного диапазона менее 1 ГГц, длина вол-

ны становится больше размеров зондируемого объекта и амплитуда отраженного сигнала существенно уменьшается. В работе [4] описан когерентный квадратурный приемник биорадиолокатора с рабочей частотой 2 ГГц, а также импульсные зондирующие СШП сигналы с центральной частотой 1 ГГц. В работе [5] предлагаются следующие параметры зондирующих сигналов. Для видеоимпульса без несущей частоты рекомендуется импульс шириной спектра больше 300..500 МГц с длительностью импульса менее 2..3 наносекунд и центральной частотой 6 ГГц. Для радиоимпульсов с гауссовой огибающей предлагается использовать несущую частоту 3,5 ГГц и относительную ширину спектра 0,17.

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время нет четких рекомендаций по выбору центральной частоты зондирующего сигнала для поиска людей в завалах.

В работах [6 – 8] описано решение задач дифракции на многослойных структурах и подповерхностных объектах. В работе [6] рассматривается задача дифракции видеоимпульсов различной формы на диэлектрическом слое, расположенном на диэлектрическом полупространстве. Электрофизические параметры слоев соответствовали песку и граниту. Длительность импульсов составляла десятки наносекунд. Приведены графики, описывающие форму отраженных импульсов во времени. Показано, что на большую глубину, без значительного искажения формы, способен проникать импульс с минимальным произведением  $\Delta t \cdot \Delta f$ , где  $\Delta t$  – длительность импульса,  $\Delta f$  – ширина его спектра. Отмечается, что оптимальной формой для зондирующего сигнала является гауссов видеоимпульс. В работе [7] решается задача дифракции зондирующего видеоимпульса в виде производной по времени от гауссового импульса длительностью 1..2,5 нс на объектах, имитирующих траншею с за-

рытыми в них металлическими трубами. Преимуществом полученных результатов является обобщенность построенных радиограмм, поскольку они не учитывают искажений формы СШП сигналов, связанных с ограничением рабочей полосы прямо-передающих антенн и искажений в приемно-усилительном тракте РЛС.

В работе [8] получены расчетные соотношения для нахождения электромагнитных полей, рассеиваемых подповерхностными объектами резонансных размеров, расположенными вблизи границы раздела двух диэлектрических полупространств. Показано, что для монохроматического зондирующего излучения частотой 900 МГц отношение модуля магнитной составляющей рассеянного поля над центром идеально проводящей сферы диаметром 15 см, погруженной в грунт на глубину 8 см, к модулю магнитной составляющей поля, отраженного поверхностью земли в отсутствие объекта, составляет 1,064. Таким образом, отражение зондирующего сигнала от поверхности грунта имеет сильный маскирующий эффект.

В приведенных выше работах электрофизические параметры грунта принимаются постоянными и не зависящими от спектра частот зондирующего сигнала.

### Основная часть

**Определение электрофизических параметров модели «человек в завале».** Согласно [9] в СВЧ диапазоне моделью человека может служить плоская структура. Считаем, что электрофизические параметры человека соответствуют электрофизическим параметрам его мышечной ткани. Предполагаем, что человек представляет собой плоский слой толщиной  $b$ , лежащий непосредственно на полубесконечном грунте и над ним находится слой строительного материала толщиной  $a$  с электрофизическими параметрами кирпича. Исходя из всего выше сказанного, отражение и прохождение электромагнитного излучения будем исследовать для трехслойной структуры, схематично представленной на рис. 1.

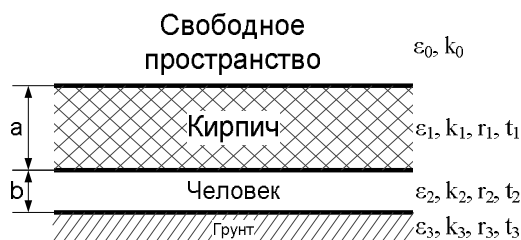


Рис. 1. Трехслойное полупространство в разрезе

В большинстве литературных источников при решении задач распространения волн в строительных конструкциях и грунте их электрофизические

параметры считаются независимыми от частоты.

Так в работе [10] указано, что если основная часть спектра зондирующего сигнала расположена выше 50 МГц, то дисперсионными свойствами грунта можно пренебречь.

В работе [11] в диапазоне частот 150...200 МГц диэлектрическая проницаемость и проводимость грунта на основании результатов измерений аппроксимируются линейной зависимостью от частоты.

В нашем случае электрофизические параметры каждого слоя будем также аппроксимировать, исходя из результатов экспериментальных измерений.

В [12] приведены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 0,15...30 ГГц для различной относительной влажности кирпича.

Исходя из приведенных графиков, можно считать, что при относительной влажности, близкой к нулю, комплексная диэлектрическая проницаемость кирпича в диапазоне частот 0,5...10 ГГц не зависит от частоты и равна

$$\varepsilon_1 = 3,8 + i0,01, \quad (1)$$

а при влажности 4.3%:

$$\varepsilon_1 = 4,5 + i0,05. \quad (2)$$

В работе [13] приведены экспериментально полученные значения относительной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon$ ) и удельной проводимости ( $\sigma$ ) мышечной ткани человека в диапазоне частот 0,433...10 ГГц. Аппроксимация этих значений при помощи функции  $\text{eps}$  из библиотеки CurveFitting математического пакета Maple [14] позволила получить в диапазоне 0,5...10 ГГц следующие зависимости  $\varepsilon$  и  $\sigma$  от частоты зондирующего сигнала:

$$\varepsilon = 0,131f^2 - 2,663f + 53,440; \quad (3)$$

$$\sigma = 0,079f^2 + 0,119f + 1,382. \quad (4)$$

Как видно из рис. 2 и 3, полученные зависимости (3) и (4) соответствуют экспериментальным данным.

В соответствии с аппроксимированными данными принимаем

$$\varepsilon_2 = (53,440 + 0,131f^2 - 2,663f) + i(1,382 + 0,079f^2 + 0,119f). \quad (5)$$

В [15] приведены частотные зависимости действительной ( $\varepsilon'$ ) и мнимой ( $\varepsilon''$ ) частей относительной диэлектрической проницаемости влажной песчано-суглинистой почвы при объемной влажности 4,3% в диапазоне 0,1...20 ГГц. Аппроксимация приведенных результатов для диапазона частот 0,5...10 ГГц позволила получить следующие выражения:

$$\varepsilon' = 0,004f^2 - 0,095f + 3,864 ; \quad (6)$$

$$\varepsilon'' = 0,006f^2 - 0,087f + 0,037 . \quad (7)$$

Как видно из рис. 4, 5, полученные зависимости (6) и (7) соответствуют приведенным в работе [15] графикам.

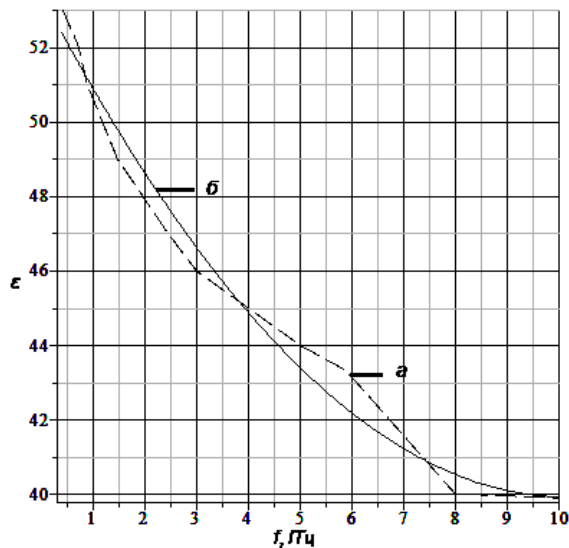


Рис. 2. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости тела человека от частоты излучения:  
а – экспериментальная;  
б – аппроксимированная

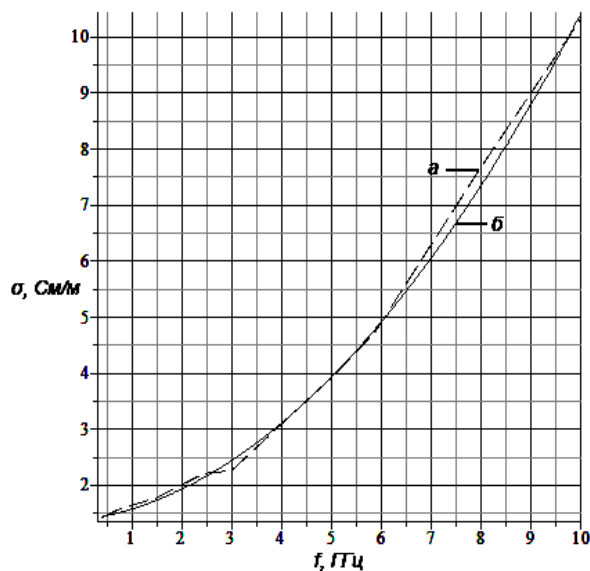


Рис. 3. Зависимости удельной проводимости тела человека от частоты излучения:  
а – экспериментальная;  
б – аппроксимированная

В соответствии с аппроксимированными данными принимаем

$$\varepsilon_3 = (0,004f^2 - 0,095f + 3,864) + i(0,006f^2 - 0,087f + 0,037) . \quad (8)$$

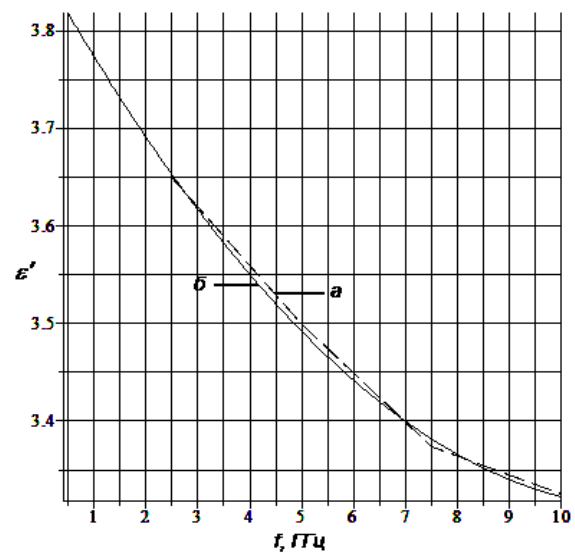


Рис. 4. Частотные зависимости действительной части относительной диэлектрической проницаемости влажной песчано-суглинистой почвы при объемной влажности 4,3%:  
а – модельная; б – аппроксимированная

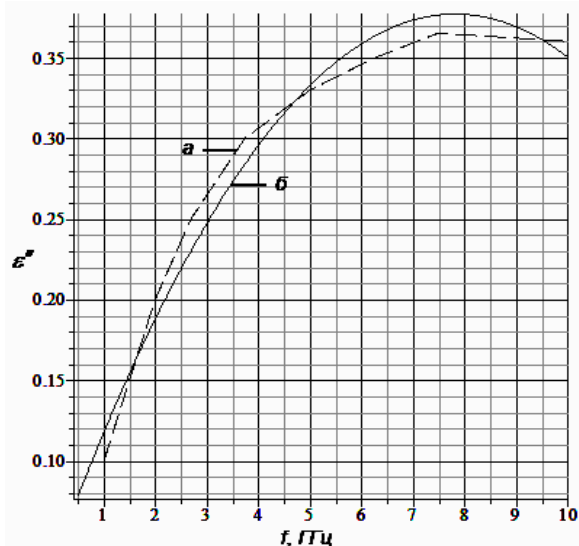


Рис. 5. Частотные зависимости мнимой части относительной диэлектрической проницаемости влажной песчано-суглинистой почвы при объемной влажности 4,3%:  
а – модельная; б – аппроксимированная

**Расчет коэффициента отражения от человека в завале.** Полагаем, что из свободного пространства нормально к поверхности кирпичного слоя (рис. 1) падает плоская электромагнитная волна.

Будем рассматривать два случая регистрации отраженного сигнала:

1. Приемная антенна расположена в свободном пространстве;
2. Приемная антенна расположена на поверхности слоя кирпича.

В первом случае коэффициент отражения от трех-  
слойной структуры  $R_1$  рассчитывается по формуле [9]:

$$R_1 = \frac{1}{D} ((r_2 + r_3 e^{i2k_2 b}) e^{i2k_1 a} + r_1 (1 + r_2 r_3 e^{2ik_2 b})), \quad (9)$$

где  $r_i = \frac{k_0 - k_i}{k_0 + k_i}$  – коэффициенты отражения от каж-  
дой границы раздела слоев ( $i = 1, 2, 3$ );

$k_0$  – волновое число в свободном пространстве;

$k_i = \frac{1}{15} \pi f \sqrt{\varepsilon_i}$  – волновое число в соответству-  
ющем слое при условии, что частота измеряется в

гигагерцах, а длина волны – в сантиметрах,

$$D = 1 + r_2 r_3 e^{i2k_2 b} + r_1 (r_2 + r_3 e^{ik_2 b}) e^{ik_1 a}.$$

Во втором случае коэффициент отражения  $R_2$   
рассчитывается по формуле [9]:

$$R_2 = \frac{t_1 (r_2 + r_3 e^{i2k_2 b}) e^{i2k_1 a}}{D}, \quad (10)$$

где  $t_i = \frac{2k_{i-1}}{k_{i-1} + k_i}$  – коэффициент прохождения

для  $i$ -го слоя.

Электрофизические параметры слоя кирпича  
при малой и повышенной влажности описываются  
уравнениями (1) и (2) соответственно.

Электрофизические параметры модели челове-  
ка и слоя грунта описываются уравнениями (5) и (8)  
соответственно. Толщину слоя  $b$ , соответствующего  
модели человека, принимаем постоянной и равной  
30 см. Результаты расчета коэффициента отражения  
в случае расположения точки приема отраженного  
излучения в свободном пространстве для различных  
толщин слоя кирпича  $a$  при различной влажности  
показаны на рис. 6, 7. Серым цветом выделен коэф-  
фициент отражения при наличии человека в завале,  
а черным – при его отсутствии.

Минимумы и максимумы коэффициента отра-  
жения обусловлены интерференционными явления-  
ми в многослойной структуре.

Из графиков видно, что с ростом частоты и  
толщины кирпичного слоя, вследствие сильного  
затухания волны, обнаружение человека стано-  
вится затруднительным, т.к. коэффициенты отра-  
жения от многослойной структуры при наличии  
человека и при его отсутствии стремятся к одному  
значению. Например, при малой влажности кирпи-  
ча при толщине слоя кирпича до 5 м верхняя грани-  
ца рабочего диапазона частот, при которых имеются  
отличия значений коэффициентов отражения, не  
превышает 8 ГГц, а при повышенной влажности –  
0,7 ГГц и при увеличении толщины слоя этот диапа-  
зон значительно сужается.

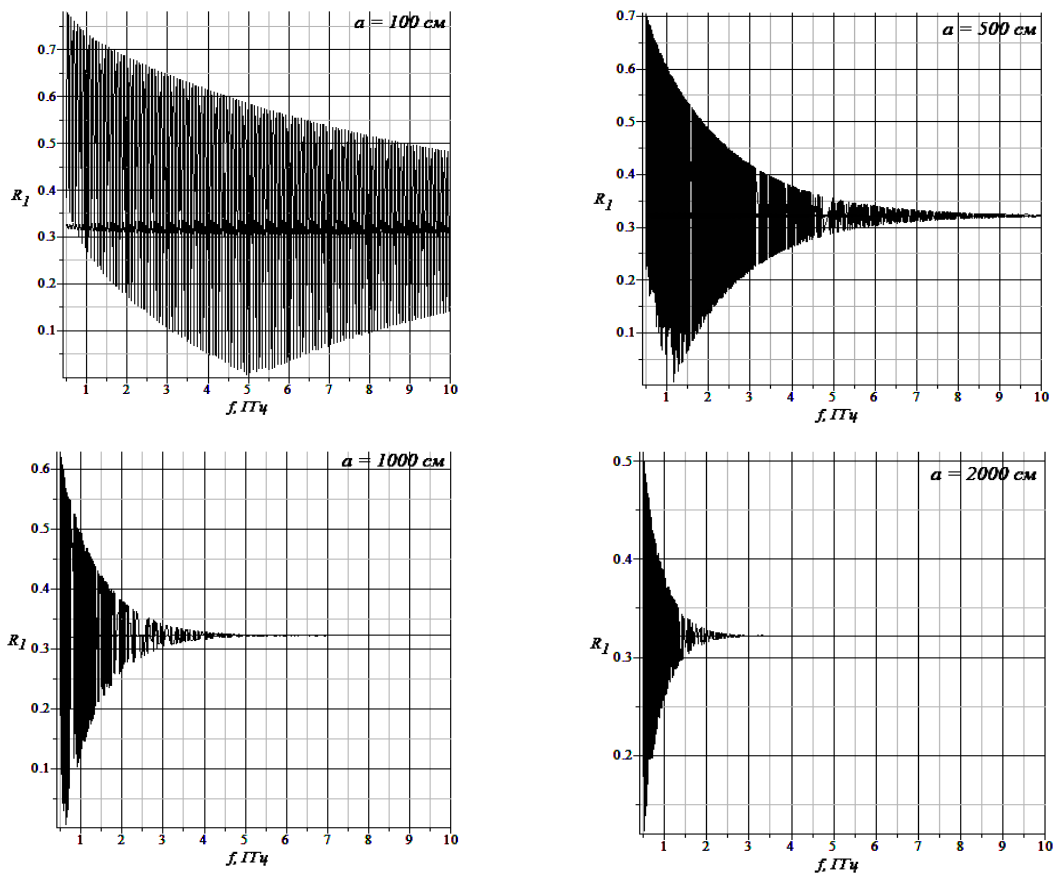


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты  
при относительной влажности слоя кирпича 0%

Если точка приема расположена непосредственно на поверхности кирпичного слоя, то об отражающих свойствах человека в завале можно судить по рис. 8, 9. Сплошной линией показана зави-

симось коэффициента отражения от частоты при наличии человека, а пунктирной линией – при его отсутствии.

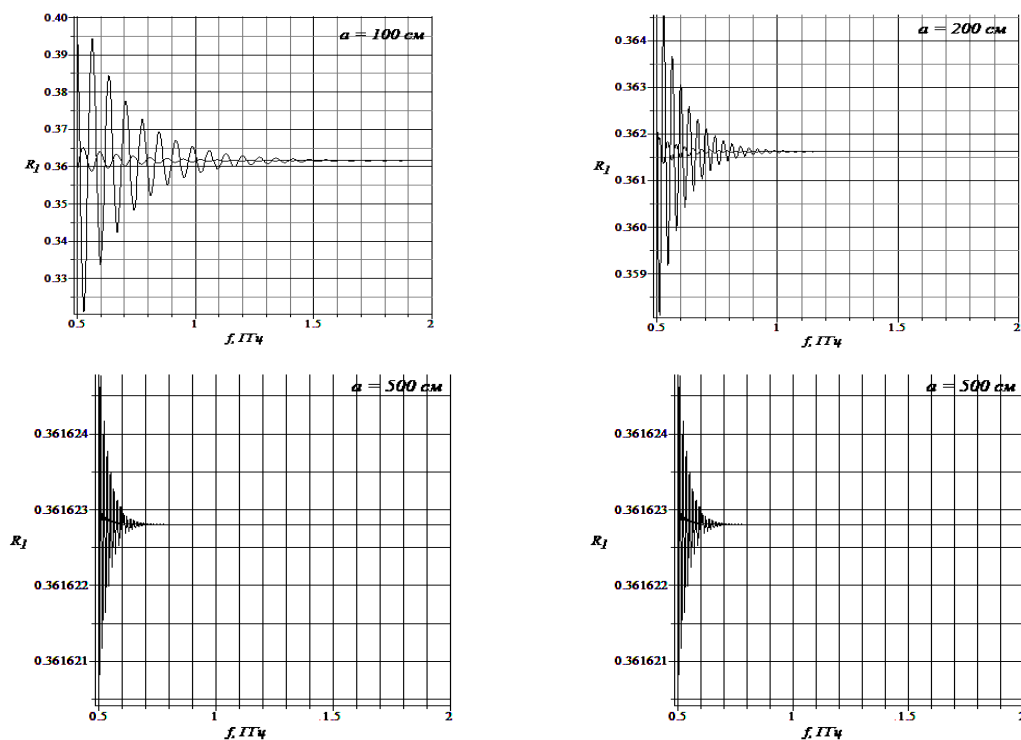


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты при относительной влажности слоя кирпича 4,3%

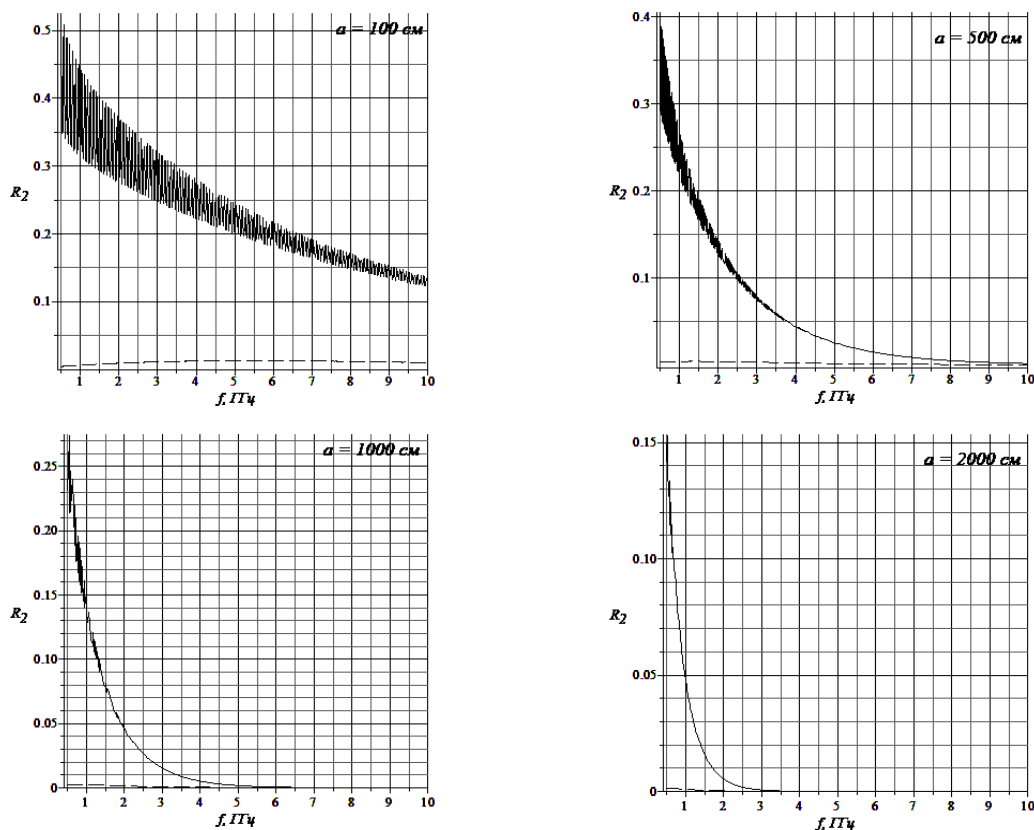


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от частоты при относительной влажности слоя кирпича 0%

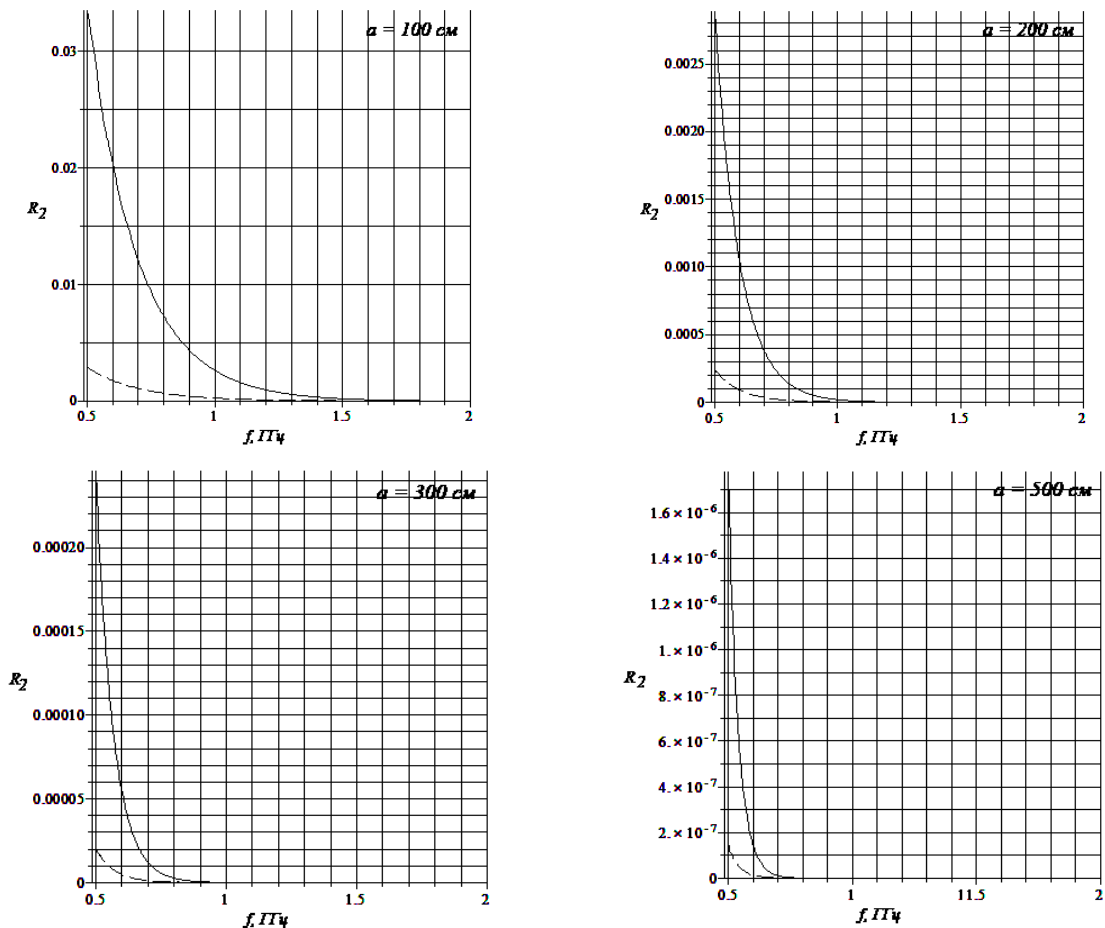


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от частоты при относительной влажности слоя кирпича 4.3%

Из графиков видно, что при данных условиях приема отраженного излучения для той же толщины кирпичного слоя ( $a = 5$  м) верхняя граница рабочего диапазона частот, при которых можно выявить отраженное от человека излучение, не превышает 9 ГГц при малой влажности и 1 ГГц при большей влажности кирпича. При расположении приемной антенны на поверхности кирпичного слоя представляется возможным обнаружить отраженное от человека излучение на глубине до 20 м при повышенной влажности (рис. 9). Однако при этом рабочий диапазон сужается и его верхняя граница не превышает 0,7 ГГц.

Таким образом, при расположении приемной антенны над слоем кирпича верхняя граница рекомендуемого рабочего диапазона частот для обнаружения человека при низкой влажности кирпича на больших глубинах не превышает 3 ГГц, а при высокой влажности – 0,7 ГГц.

### Выводы

Проведено исследование процессов отражения и затухания плоских волн в диапазоне частот, соответствующих спектру применяемых на практике зондирующих СШП сигналов для поиска людей в

завалах. При этом учитывались дисперсионные свойства строительного материала на примере слоя кирпича, под которым находится человек, человека и грунта.

Показано, что при расположении приемной антенны в свободном пространстве сигнал, отраженный от человека маскируется излучением, отраженным от поверхности кирпичного слоя.

При расположении приемной антенны непосредственно на поверхности кирпичного слоя маскирующий эффект существенно снижается.

Результаты исследований показали, что для обнаружения человека под слоем кирпича с низкой влажностью на больших глубинах (порядка 10 м) не целесообразно использовать центральную частоту зондирующего излучения свыше 3 ГГц, а при высокой влажности кирпича – свыше 0,7 ГГц.

Актуальной остается задача определения зависимости искажений зондирующего сигнала от его формы и центральной частоты.

Дальнейшие исследования будут связаны с определением формы и параметров зондирующего СШП сигнала, при которых в процессе распространения и отражения от человека он будет испытывать минимальные искажения.

**Список литературы**

1. Биорадиолокация / под ред. А.С. Бугаева, С.И. Иващенко, И.Я. Иммореева. – М.: Изд-во АГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. – 396 с.
2. Лазоренко О.В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 166-194.
3. Бугаев А.С. Дистанционный контроль параметров кардиореспираторной системы человека с помощью радиолокационных средств / А.С. Бугаев [и др.] // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2004. – № 10. – С. 24-31.
4. Бугаев А.С. Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения / А.С. Бугаев [и др.] // 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. Массалов С.А. Дифракция видеоимпульсов на слоистых диэлектрических структурах / С.А. Массалов, А.О. Пузанов // Радиофизика и астрономия. – 1997. – Т. 2. – № 1. – С. 85-94.
7. Варяница-Роцупкина Л.А. Дифракция видеоимпульсной электромагнитной волны на подповерхностных объектах / Л.А. Варяница-Роцупкина, Г.П. Почанин // Радиофизика и радиоэлектроника, 2006. – Т. 11, № 2. – С. 240-252.
8. Сухоревский О.И. Рассеяние электромагнитных волн подповерхностными объектами резонансных размеров / О.И. Сухоревский, Г.С. Залевский // Радиофизика и астрономия, 1998. – Т. 3, № 1. – С. 37-42.
9. Кинг Р. Антенны в материальных средах: в 2-х книгах. Кн. 1; пер. с англ. / Р. Кинг, Г. Смит. – М.: 1984. – 824 с., ил.
10. Сухаревский О.И. Обратное рассеяние плоской импульсной волны на идеально проводящем объекте, находящемся вблизи границы однородного полупространства / О.И. Сухаревский [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Т. 3, № 2. – С. 137-146.
11. Сучак В.Г. Оценка разрешения по глубине при подповерхностном зондировании / В.Г. Сучак // Радиофизика и радиоастрономия, 1998. – Т. 3, № 2. – С. 130-136.
12. Лецанский Ю.И. Расчет диэлектрических характеристик кирпича и цементного камня при переменной влажности / Ю.И. Лецанский, Н.В. Ульяничев // Дефектоскопия. – 1980. – № 7. – С. 34-39.
13. Березовский В.А. Биофизические характеристики тканей человека / В.А. Березовский. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
14. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. – М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2011. – 800 с.
15. Боярский Д.А. Учет диэлектрических свойств связанной воды при моделировании эффективной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ-диапазоне / Д.А. Боярский, В.В. Тихонов // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 4. – С. 446-454.

Поступила в редколлегию 18.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Барсов, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### **ДИФРАКЦІЯ НАДШИРОКОСМУГОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУРАХ**

Н.А. Коваленко, В.Д. Сахацький

Проведено дослідження процесів віддзеркалення і загасання плоских хвиль в діапазоні частот, відповідних спектру вживаних на практиці зондуючих сигналів НШС для пошуку людей в завалах. Враховані дисперсійні властивості будівельного матеріалу, під яким знаходиться чоловік, людини і ґрунту. Показано, що при розташуванні приймальної антени у вільному просторі сигнал, відображений від людини, маскується випромінюванням, відображеним від поверхні цегляного шару, а при розташуванні приймальної антени на поверхні шару будівельного матеріалу маскуючий ефект істотно знижується.

**Ключові слова:** зондуєчий сигнал, дифракція, пошук людини за перешкодою, тришарова структура, віддзеркалення сигналу, що маскує ефект.

### **THE DIFFRACTION OF UWB RADIATION ON MULTILAYER STRUCTURES**

N.A. Kovalenko, V.D. Sahatsky

The investigation processes of reflection and attenuation of plane waves in the frequency range corresponding to the spectrum used in the practice of sounding UWB signals to search for people in the rubble. Taken into consideration the dispersion properties of building materials, under which there is a human, human and earth. It is shown that when the location of the receiving antenna there is in free space, signal reflected from the human, masked by radiation reflected from the surface of the brick-layer, and when the location of the receiving antenna on the surface there is on the layer of building material masking effect is significantly reduced.

**Keywords:** sounding signal, diffraction, search of man, three-layered structure, reflection of signal, an after barrier, masking an effect.