

УДК 621.396.96, 537.226

## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА СПЕКТРА ЭХО-СИГНАЛОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО РАДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДЫ

А. П. Зуев<sup>1</sup>, В. А. Могилко<sup>1</sup>, С. С. Негодяев<sup>1,2</sup>, А. В. Царьков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Получена 12 августа 2013 г.

**Аннотация.** Предложен алгоритм определения проницаемости слабо отражающей диэлектрической преграды для зондирующего излучения устройств сверхширокополосной (СШП) локации подвижных объектов. Признаком проницаемости преграды является наличие на входе приемника отраженных от объектов за преградой зондирующих импульсов. В основу алгоритма определения проницаемости преграды положен спектральный анализ эхо-сигналов СШП-радиолокатора. Установлено, что характеристикой проницаемости преграды является амплитуда высокочастотных составляющих спектра.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный радар, проницаемость преграды, алгоритм анализа спектра, радиовидение сквозь стены, биорадиолокация.

**Abstract:** The algorithm of determining the penetrability of weakly reflecting dielectric barrier for UWB radiation of devices through the wall vision is proposed. The criterion of the penetrability of the barrier is the presence on receiver input reflected pulses from objects behind the barrier. The algorithm determining the penetrability barrier based on spectral analysis echo-signals of UWB radar. Found that the penetrability of the barrier characteristic is the amplitude of the high frequency spectral components.

**Key words:** ultra wide band radar, signal propagation, penetrability of barrier, spectrum analysis algorithm, through wall vision, bioradars.

## 1. Введение

Задача обнаружения людей за оптически-непрозрачными преградами имеет важное значение при проведении спасательных работ при стихийных и техногенных катастрофах (см. обзоры [1, 2]). Основным физическим методом для обнаружения людей сквозь стены (through wall vision) является радиовидение.

Оптически непроницаемые преграды можно условно разделить на два типа:

- отражающие радиоволны (металлические);
- поглощающие радиоволны (диэлектрические).

Для металлических преград задача создания приемлемых по технико-экономическим характеристикам приборов дистанционного детектирования объектов за такими преградами в настоящее время еще не решена.

Для диэлектрических преград на сегодняшний день уже существует класс компактных и маломощных сверхширокополосных (СШП) радиолокаторов. Разработаны эффективные алгоритмы интерпретации данных СШП-локации для обнаружения за преградами подвижных объектов [3 – 6]. Однако, при большом уровне поглощения радиоизлучения диэлектрической преградой движущиеся объекты также не могут быть обнаружены, поэтому задача оснащения СШП радиолокатора функцией определения проницаемости преграды, в дополнение к операции обнаружения, является актуальной. Кроме того, заметим, что классический способ определения проницаемости преград из типовых строительных материалов [7, 8] подразумевает размещение передатчика и приемника излучения по разные стороны преграды, что неприменимо в реальных спасательных операциях для СШП радаров, у которых передатчик и приемник, как правило, конструктивно объединены в одном устройстве, т.е. расположены по одну сторону преграды. Таким образом, для улучшения характеристик существующих поисковых технических средств СШП-локации необходима разработка алгоритма оперативного определения

проницаемости преград без изменений в конструкции используемых приборов. Подходы к решению этой задачи описаны в ряде источников [9 – 11].

## 2. Влияние проницаемости преграды на спектральный состав эхо-сигналов

В настоящей работе экспериментально показана возможность определения степени проницаемости диэлектрических преград на основе анализа спектра отраженных от препятствий эхо-сигналов. В проведенных исследованиях использовался одномерный малогабаритный СШП-радиолокатор [12, 13].

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

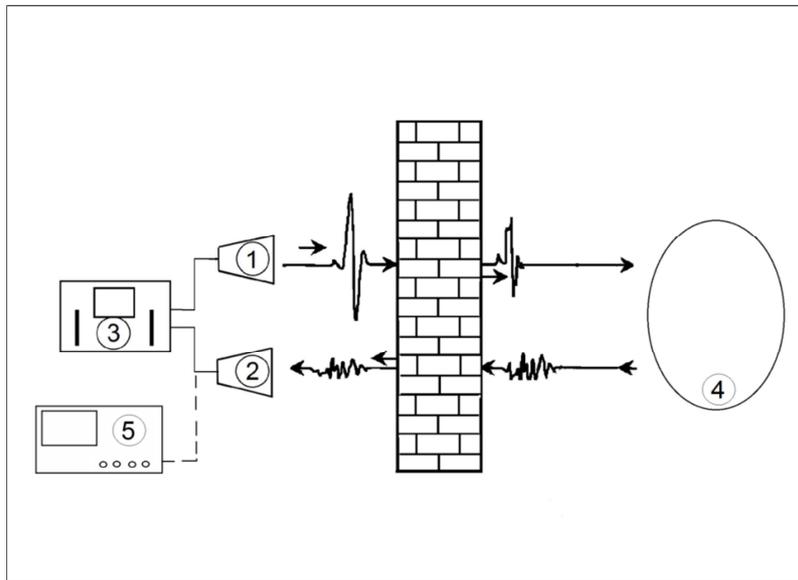


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1- передающая антенна, 2- приемная антенна, 3 – блок синхронизации, обработки и съема информации СШП радиолокатора, 4 – отражающий объект, 5 – осциллограф Tektronix DPO 70804.

На передающую антенну 1 с блока синхронизации, обработки и съема информации 3 подавался короткий импульс длительностью ~ 1 нс. Приемная антенна 2 регистрировала как отраженные от препятствий сигналы, так и прямую наводку от передающей антенны, избавиться от которой на практике полностью невозможно. Приемная антенна могла подключаться либо к блоку 3,

либо к осциллографу 5 (Tektronix DPO 70804) для спектрального анализа принимаемого сигнала.

Типичные осциллограммы возбуждающего импульса и эхо-сигнала регистрируемого приемной антенной представлены на рис. 2 – 3.

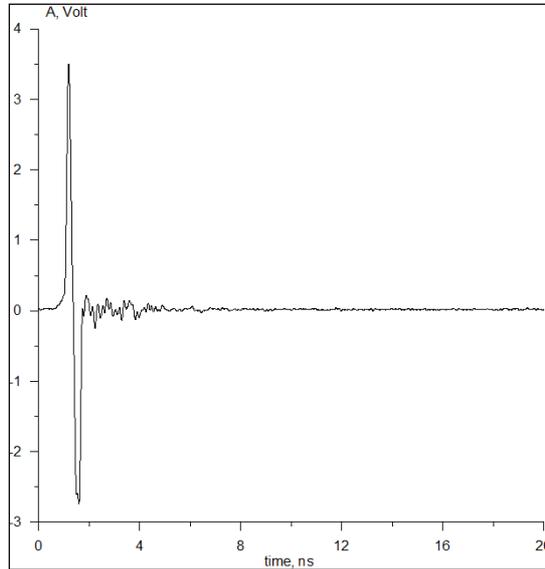


Рис. 2. Осциллограмма сигнала, возбуждающего передающую антенну.

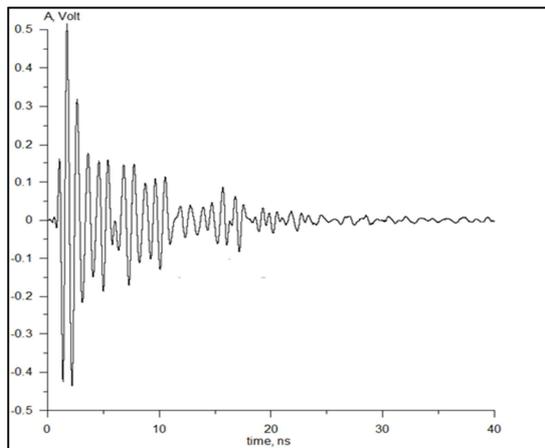


Рис. 3. Эхо-сигнал с приемной антенны.

Стробоскопический приемник блока обработки 3 (рис. 1) позволяет измерить (оцифровать) уровни сигнала с приемной антенны в соответствии с алгоритмом авторов настоящей работы, подробно описанным в [6]. Результатом измерения является оцифрованный сигнал с приемной антенны, представляющий собой зависимость амплитуды сигнала от времени (с шагом дискретности измерений в стробоскопическом режиме приема) – массив данных из 256 точек с интервалом 0,15 нс в диапазоне времени

$256 \times 0,15 \text{ нс} = 38,4 \text{ нс}$ . Заметим для использования в дальнейшем обсуждении, что этот сигнал, зарегистрированный блоком 3 СШП радара, аналогичен осциллограмме представленной на рис. 3.

Сигнал с антенны приемника является суперпозицией наведенного антенной передатчика сигнала и отраженных от объектов за преградой сигналов, которые гораздо слабее.

Если антенны приемника и передатчика радара располагают непосредственно на преграде (стенке, перекрытии и т.п.), то при физически непроницаемой преграде на антенну приемника попадают практически только прямые наводки от затухающих колебаний в антенне передатчика. Если преграда пропускает СШП излучение, то антенной регистрируются еще и отраженные от препятствий за преградой зондирующие импульсы.

При этом спектральный состав отраженного сигнала и сигнала наводки отличаются. Спектральная плотность сигнала прямой наводки изменяется с течением времени после подачи импульса на антенну передатчика. В момент излучения зондирующего импульса спектр излучения практически определяется спектром очень короткого зондирующего импульса (рис. 2). Его спектр представлен на рис. 4 и имеет максимум в диапазоне частот 1 – 2 ГГц.

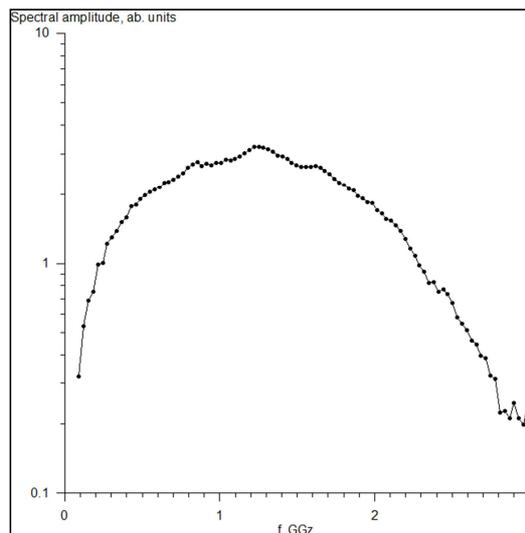


Рис. 4. Спектр возбуждающего импульса.

За короткое время порядка 10 нс колебания в антенне передатчика начинают затухать. При этом спектр сигнала меняется, в нем начинают

доминировать собственные частоты колебаний антенны (т.н. «звон» антенны). Для использованных в данной работе антенн эти частоты находятся в диапазоне 1 ГГц и ниже. Высокочастотные составляющие в спектре деградируют. В отраженном же сигнале, приходящем с временной задержкой после излучения зондирующего импульса, спектральная плотность такая же, как в зондирующем импульсе в момент излучения. Поэтому наличие в спектре входного сигнала высокочастотных составляющих, обусловленных наличием отраженных от препятствий за преградой зондирующих импульсов, будет свидетельствовать о ее проницаемости, а амплитуда высокочастотных составляющих спектра будет нести информацию о поглощающей способности преграды.

Описанный выше ожидаемый эффект изменения спектральной плотности эхо-сигналов для двух различных ситуаций в настоящей работе был опробован экспериментально. Результаты эксперимента подтверждающие указанный эффект продемонстрированы на спектрограммах (рис. 5а и 5б).

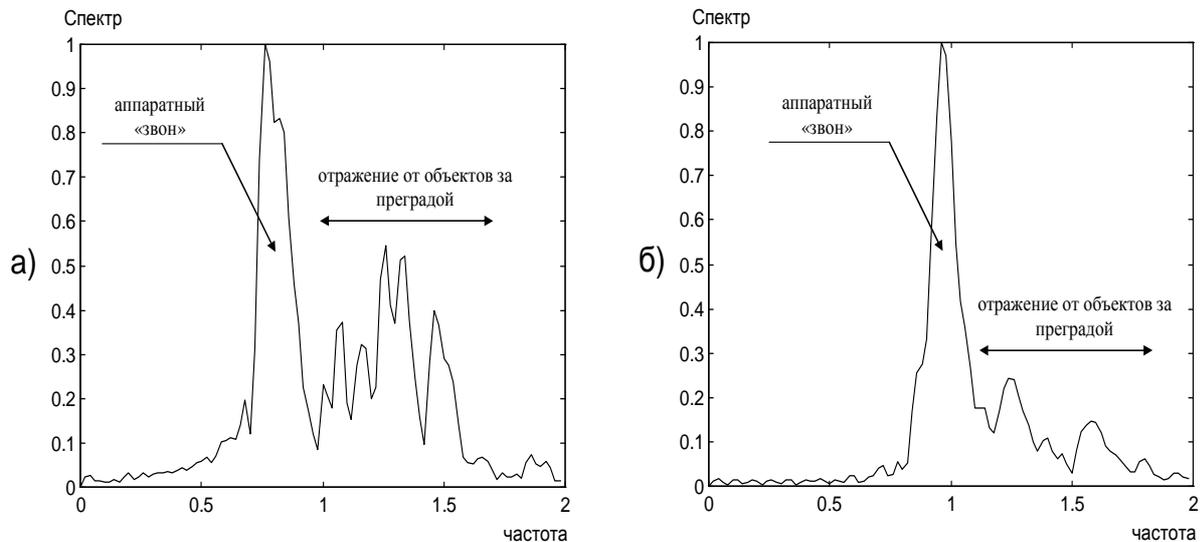


Рис. 5. Спектры сигнала в отсутствие преграды (а) и при непрозрачной для излучения преграде (б).

В первом случае СШП радар был ориентирован в свободное пространство, преграда перед ним отсутствовала, и он принимал все отраженные от объектов импульсы. Во втором случае приемная и передающая антенна были укрыты

поглощающим материалом (имитация преграды), обеспечивающим ослабление радиоизлучения 13 – 15 дБм в интервале частот 1 – 3 ГГц.

Из сравнения спектров следует вывод, что укрытие антенн поглощающим материалом (см.рис.5б) практически не изменяет уровень наводок на антенну приемника, в то время как амплитуда отраженных сигналов в высокочастотной части спектра меняется существенно. На этом основании можно считать, что во втором случае отраженные импульсы практически не доходят до антенны приемника. Итак, для непрозрачной преграды, на входе приемника имеет место отсутствие отраженных от объектов зондирующих импульсов, что приводит соответственно к исчезновению высокочастотных составляющих в спектре принимаемого сигнала.

### **3.Алгоритм анализа спектра эхо-сигналов**

На основании результатов проведенных экспериментов был предложен алгоритм оценки проницаемости преграды использующий анализ спектра эхо-сигнала, который не требует изменений в конструкции существующих СШП радаров и предполагает только модификацию служебного программного обеспечения. Для конкретного образца, описанного в [12, 13], алгоритм сводится к следующим действиям:

1. В принятом радаром эхо-сигнале (см. рис. 3) исключается начальный участок, в котором сигнал наводки велик, путем простого обнуления сигнала от начала регистрации до некоторого момента времени  $t$ , когда амплитуда наводок сильно уменьшается. Это равносильно тому, что первые  $n$  точек ( $n < 256$ ) оцифрованного сигнала с приемной антенны обнуляются. Физически это означает, что из рассмотрения исключается зона с радиусом  $R = c \cdot t / 2$ , где  $c$  – скорость света, и во внимание принимаются только сигналы, пришедшие на приемную антенну с больших расстояний.

2. К полученному массиву данных из 256 точек применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ) с использованием стандартной гауссовской весовой функции. В результате БПФ в частотном диапазоне получаются 128

точек спектральной амплитуды сигнала  $X(m)$ ,  $m=1\div 128$ . Типичные спектры для рассмотренных выше двух сценариев работы СШП радиолокатора в отсутствие преграды и при наличии непрозрачной для радиоизлучения преграды представлены на рис. 6.

3. Производится сравнение высокочастотных составляющих спектров выше некоторой подбираемой частоты, обозначенной на рис. 6 как  $m_f$ . В качестве критерия количественной оценки проницаемости предлагается принять эффективную площадь  $S = \sum_{m_f}^{128} X(m)$  под кривой спектральной зависимости для высокочастотной части (для точек  $m < i \leq 128$ ).

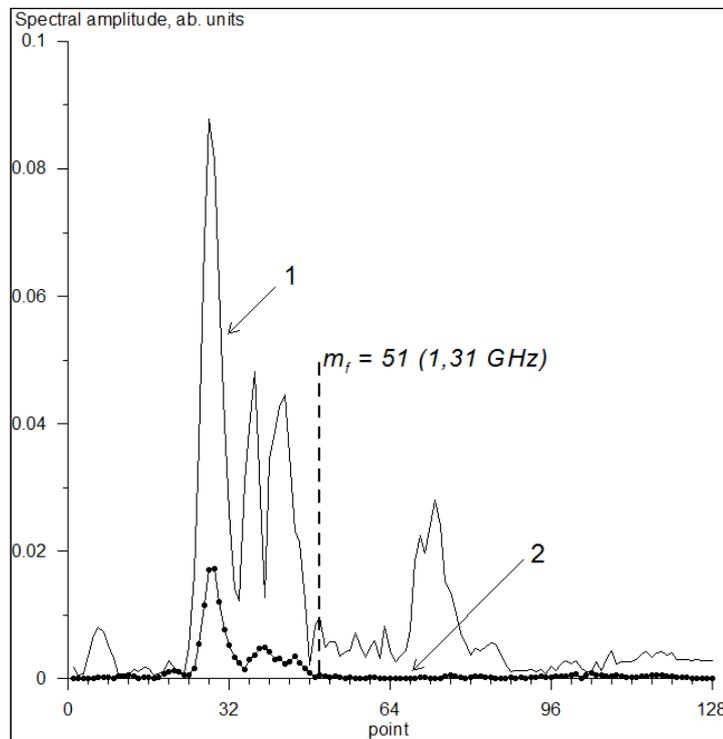


Рис. 6. Быстрое преобразование Фурье сигналов приемника СШП радара в случае проницаемой (1) и непроницаемой (2) преград

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма с имеющимся в наличии образцом СШП-локатора [12, 13] были проведены натурные испытания с реальными строительными конструкциями (кирпичные и ж/б стены, межэтажные перекрытия и т.д.), во время которых контролировалась прозрачность преграды. Преграда считалась прозрачной, если СШП радиолокатор давал устойчивое обнаружение движения модельного объекта за

ней. На рис. 7 по оси абсцисс отложен условный номер испытания, соответствующий некоторой преграде, а по оси ординат – величина параметра  $S$ , которая вычислялась для каждой из преград как описано выше (п.1-3). На приведенном рисунке круглыми символами обозначены эксперименты, в которых движение объекта не обнаруживалось, треугольными – те, в которых движение устойчиво обнаруживалось.

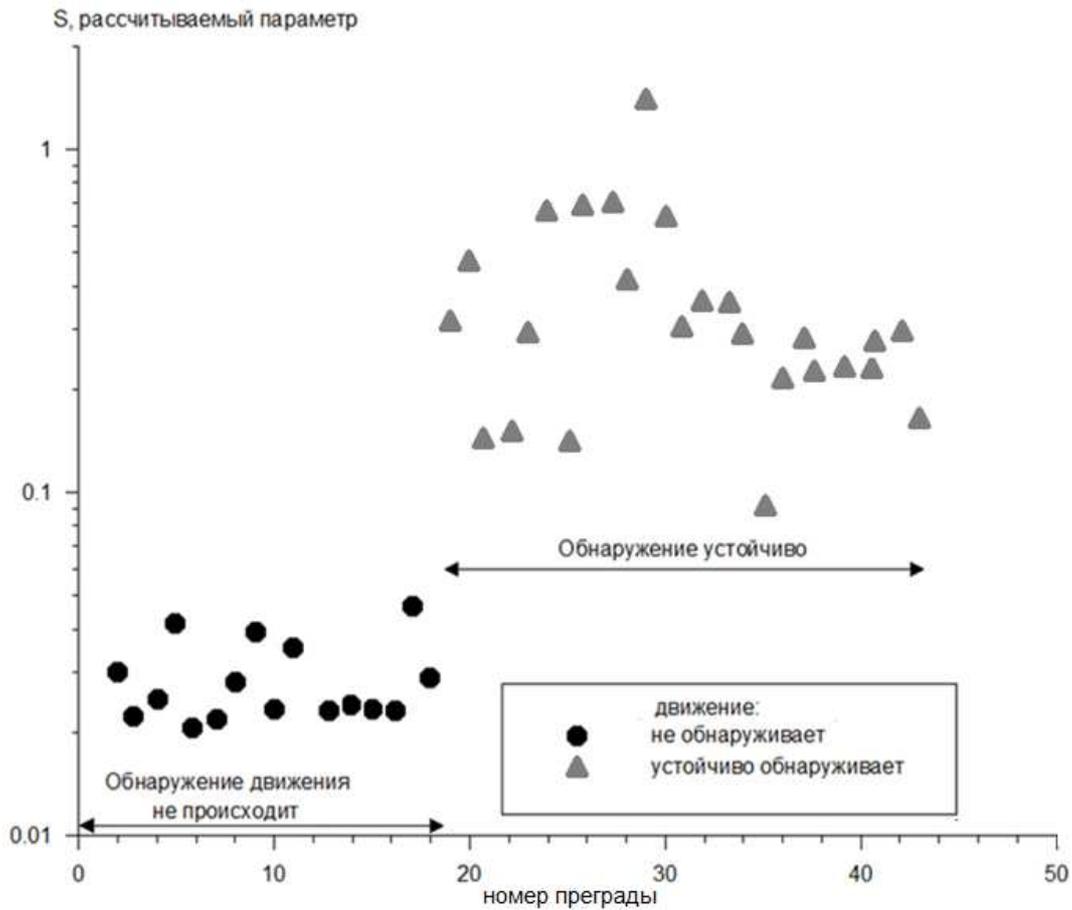


Рис. 7. Сопоставление результатов обнаружения движения объектов за преградами с рассчитываемым параметром  $S$ .

Из анализа рис.7 можно сделать выводы, что при соответствующем выборе величины параметра  $S_{пор}$ , его величину можно считать пороговым критерием для селекции проницаемых и непроницаемых (поглощающих) преград. Если подобрать поглощение некой эталонной преграды, которая будет еще проницаема, т.е. движение через нее обнаруживается, и в дальнейшем сравнивать параметр  $S$  для тестируемой преграды с параметром  $S_{пор}$  эталонной

преграды, то можно утверждать, что при  $S > S_{\text{пор}}$  тестируемая преграда проницаема.

#### 4. Выводы

Предложен алгоритм оценки проницаемости диэлектрических материалов для устройств СШП радиозондирования (локации) при решении задач поиска людей за оптически непрозрачными преградами [14]. Показано, что проницаемость для радиоизлучения диэлектрической поглощающей преграды можно оценить путем анализа спектральной плотности принимаемого эхо-сигнала.

Принимаемый эхо-сигнал является суперпозицией сигнала, отраженного от объектов за преградой и наведенного сигнала от передающей антенны. Спектр радиоимпульсов отраженных от объектов за преградой отличается от спектра наводок со стороны антенны передатчика наличием высокочастотных составляющих. Для количественной оценки проницаемости преграды предложенным алгоритмом вводится и вычисляется эффективная площадь – интеграл от спектральной плотности эхо-сигнала по высокочастотной части спектра. Критерием проницаемости может служить превышение данной площади над пороговым значением, которое находится из эксперимента.

Использование предложенного алгоритма решает задачу повышения достоверности результатов работы приборов для обнаружения людей при техногенных катастрофах имеющимися образцами СШП локации без конструктивных доработок за счет модификации только программных средств.

#### Литература

1. Ultra Wideband Technology Overview. // White Paper, Prepared by MobilVox, Inc. October 2004.
2. И. Я. Иммореев. Практическое использование сверхширокополосных радаров. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. № 9. 2009. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/sep09/5/text.html>.

3. D. Kocur, J. Gamec, M. Švecová, M. Gamcová, J. Rovňáková. Imaging Method: An Efficient Algorithm for Moving Target Tracking by UWB Radar. // Acta Polytechnica Hungarica Vol. 7, No. 3, 2010.
4. Патент 2441252 РФ, МПК G01S13/20. Способ обнаружения движущихся объектов через непрозрачные преграды / Зуев А. П., Леонтьев С. К., Мешков М. А. и др. – Оpubл. 27.01.2012. – Бюл. №3.
5. Патент 2384860 РФ, МПК G01S13/04. Способ обнаружения людей и движущихся объектов за преградой и устройство для его осуществления / Линников О. Н., Сосулин Ю. Г., Суворов В. И. и др. – Оpubл. 20.03.2010. – Бюл. №. 8.
6. В. А. Безуглов, С. С. Негодяев, А. В. Царьков. Алгоритм обработки данных СШП радиолокатора для обнаружения подвижных объектов за оптически непрозрачными преградами. // Спецтехника и связь. №2. 2013.
7. А. И. Рыжов, В. А. Лазарев, Т. И. Мохсени, Д. В. Никеров, Ю. В. Андреев, А. С. Дмитриев, Н. П. Чубинский. Ослабление сверхширокополосных хаотических сигналов диапазона 3–5ГГц при прохождении через стены зданий. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. №5. 2012. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may12/1/text.html>.
8. A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, A. Bayram, A. M. Attiya, S. M. Riad. Ultrawideband Through-the-Wall Propagation. // IEEE Proc. on Microwave, Antennas and Propagation, Vol. 152, No. 6, pp. 581-588, Dec. 2005.
9. M. M. Nikolic, A. Nehorai, A. R. Djordjevic. Estimating Moving Targets Behind Reinforced Walls Using Radar. // IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 57, No. 11, 2009.
10. X. Li, X. Huang, T. Jin. Estimation of wall parameters by exploiting correlation of echoes in time domain. // Electronics Letters, Vol. 46, No. 23, 2010.
11. P. Protiva, J. Mrkvica, J. Machác. Estimation of Wall Parameters From Time-Delay-Only Through-Wall Radar Measurements // IEEE Trans. Antennas Propag, Vol. 59, No. 11, 2011.

12. Компактный радар "Голограф" для поиска движущихся объектов за оптически непрозрачными преградами. // [Электронный ресурс]. URL: <http://cniihm.ru/image/?mediaid=594>.

13. "Голограф" – описание и ТТХ. // [Электронный ресурс]. URL: <http://cniihm.ru/image/?mediaid=595>.

14. Заявка на изобретение 2012133253 РФ. Способ определения проницаемости преграды для зондирующего излучения сверхширокополосного радара / Зуев А.П., Мешков М.А., Могилко В.А. и др. – Подана 03.08.2012.