

Моделирование процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой и сверхмалой дальности

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0712294

Разевиг В. В.

УДК 621.396.967

Россия, МГТУ им. Баумана

vrazevig@rslab.ru

Введение

Радиолокация представляет собой средство расширения возможностей человека определять наличие и положение объектов за счет использования явлений отражения радиоволн этими объектами. В последнее время все больший интерес вызывает радиолокация малой и сверхмалой дальности, позволяющая определять форму и, в некоторых случаях, внутреннюю структуру зондируемых объектов.

Одним из существующих на сегодняшний день приложений данной технологии является подповерхностная радиолокация как средство неразрушающего контроля строительных конструкций (кирпичной кладки, стеновых панелей, бетонных и железобетонных монолитов и т.п.) с целью обнаружения скрытых предметов (проводов, арматуры, различных неоднородностей и инородных тел) [4, 18]. Также радиолокационные методы широко используются в системах досмотра пассажиров, предназначенных для обнаружения запрещенных к проносу предметов [3, 21], и в биомедицине [22, 23].

Процесс получения радиоизображения обследуемого объекта заключается в регистрации интерференционной картины (радиоголограммы), формирующейся в результате взаимодействия опорной волны и волны, отраженной от объекта, и последующего восстановления радиоголограммы с помощью специальных методов.

Для проектирования и оценки эффективности современных радиолокаторов, для проверки разрабатываемых алгоритмов восстановления необходимы радиоголограммы различных объектов, полученные в различных условиях. Получение радиоголограмм экспериментальными методами связано с измерением полей рассеяния реальных объектов. Такие эксперименты достаточно трудоемки и дороги. Поэтому весьма актуальной явля-

ется задача моделирования процессов рассеяния электромагнитных волн объектами исследования.

Цель данной исследования состоит в разработке и реализации на ЭВМ метода математического моделирования процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой и сверхмалой дальности.

1. Методы решения задач электромагнитного рассеяния

Аналитическое решение задачи рассеяния существует только для ограниченного набора простых тел, таких как плоскость, цилиндр, сфера, клин [9], во всех остальных случаях используют численные методы [8]. Согласно установившейся терминологии, все эти методы подразделяют на строгие, асимптотические и гибридные [2].

Поскольку реализация строгих методов решения задачи дифракции сопряжена с большими вычислительными затратами, иногда бывает целесообразно для анализа полей рассеяния на объектах сложной пространственной конфигурации применять различные упрощения и допущения. Такие допущения, с учетом достаточно очевидного физического смысла конкретных электродинамических процессов, привели к появлению так называемых физических моделей [15]. Наибольший интерес из таких моделей представляют феноменологическая и аналоговая модели.

Среди феноменологических моделей наибольшее распространение получили модели, основанные на лучевых представлениях полей рассеяния, и модели, базирующиеся на принципе Гюйгенса-Френеля, согласно которому каждая точка волнового фронта рассеянного поля рассматривается как источник вторичных волн. К этому типу моделей относится модель локальных источников рассеяния. Несмотря на то что все эти модели имеют одни и те же методологические основы, они имеют особенности, которые проявляются при дополнительных упрощениях и допущениях математического и физического характера [6]. Аналоговой моделью принято называть стохастическую модель «блестящих» точек, получившую широкое распространение при анализе рассеянных полей от объектов, которые представлены в виде совокупности локальных отражателей [10].

Современные математические модели и алгоритмы расчета полей рассеяния можно разделить на две группы [8]. В первую группу входят модели, основанные на модели локальных рассеивателей, суть которой состоит в том, что на объекте исследования определенным образом выбирают наиболее «яркие» элементы, для каждого элемента определяют характеристику рассеяния и координаты фазового центра рассеяния, а затем проводят интегрирование по всем элементам [17, 15]. При этом основная сложность заключается в правильном выборе «ярких» элементов и их фазовых центров, поэтому расчеты по этой модели носят грубый оценочный характер.

Во вторую группу входят модели, опирающиеся на геометрические модели объектов, суть которых сводится к сведению модели объекта к фацетной, т.е. состоящей из совокупности плоских ячеек с известной функцией рассеяния [16, 7]. Например, в [7] рассматривается аппроксимация гладкой поверхности тела треугольными фацетами, а изло-

мов поверхности — прямыми ребрами. Поле, рассеянное каждым факетом и каждым ребром, рассчитывается отдельно, а затем эти поля суммируются с учетом взаимного расположения факетов и ребер.

Основная проблема использования существующих в настоящее время численных методов заключается в их алгоритмической и вычислительной сложности, при этом нахождение поля рассеяния каждого объекта исследования превращается в самостоятельную задачу [18]. Из-за этого в работах, посвященных компьютерному моделированию в области радиолокации малой дальности, в качестве объекта исследования обычно выступает набор отдельных точечных отражателей [14, 20, 21]. Однако реальные объемные объекты имеют сплошную поверхность, для которой должны применяться соответствующие аппроксимации.

2. Моделирование процесса регистрации радиоголограмм

Перейдем к разработке технологии синтеза радиоголограмм произвольных объектов в интересах проектирования голографических подповерхностных радиолокаторов [4] и радиолокаторов для поиска запрещенных к проносу предметов, скрытых под одеждой человека [3], позволяющей оперативно моделировать радиоголограммы наблюдаемых объектов произвольной формы для различных частот, расстояний до объекта, конфигураций антенных систем, шагов сканирования и пр. Для этого нужно создать модель наблюдаемого объекта и решить задачу электромагнитного рассеяния на этом объекте.

2.1. Моделирование формы наблюдаемого объекта

Важной самостоятельной задачей при моделировании рассеяния электромагнитных волн является выбор способа описания поверхности объекта. Основным требованием к способу описания является удобство задания поверхности при компьютерном моделировании. В результате моделирования поверхности объекта для дальнейших расчетов должны быть доступны координаты каждой точки поверхности и вектор нормали к ней.

Наиболее распространенным способом описания формы объекта является аппроксимация поверхности реального тела совокупностью связанных между собой плоских треугольников или четырехугольников, называемых факетами, при этом размер факета определяется кривизной поверхности объекта.

Для задания формы объекта в настоящем исследовании использовался пакет Autodesk 3ds Max [5] — система для создания и редактирования трехмерной графики и анимации, располагающая обширными средствами для создания разнообразных по форме и сложности трехмерных компьютерных моделей, с использованием разнообразных техник и механизмов, включающих следующие:

- полигональное моделирование, в которое входят Editable mesh (редактируемая поверхность) и Editable poly (редактируемый полигон) — это самый распространен-

ный метод моделирования, используется для создания как сложных, так и низкополигональных моделей;

- моделирование на основе неоднородных рациональных В-сплайнов;
- моделирование на основе так называемых «сеток кусков» или поверхностей Безье (Editable patch) — подходит для моделирования тел вращения;
- моделирование с использованием встроенных библиотек стандартных параметрических объектов (примитивов) и модификаторов.

Моделирование на основе стандартных объектов, как правило, является основным методом моделирования и служит отправной точкой для создания объектов сложной структуры, что связано с использованием примитивов в сочетании друг с другом как элементарных частей составных объектов.

Формат файлов, используемый программой 3ds Max, является закрытым и недоступным для сторонних разработчиков, поэтому получение фацетных моделей объектов, созданных в 3ds Max, осуществлялось с помощью экспорта в формат STL (от STereoLitorgraphy) — открытый формат, широко используемый для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования, обычно, методом стереолитографии. В STL-файле информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей. В настоящее время STL поддерживается во многих системах автоматизированного проектирования и используется не столько для целей быстрого прототипирования, сколько в качестве нейтрального формата обмена геометрическими данными.

На рис. 1 приведена фотография и фацетная модель газового пистолета, являющегося объектом дальнейших исследований.

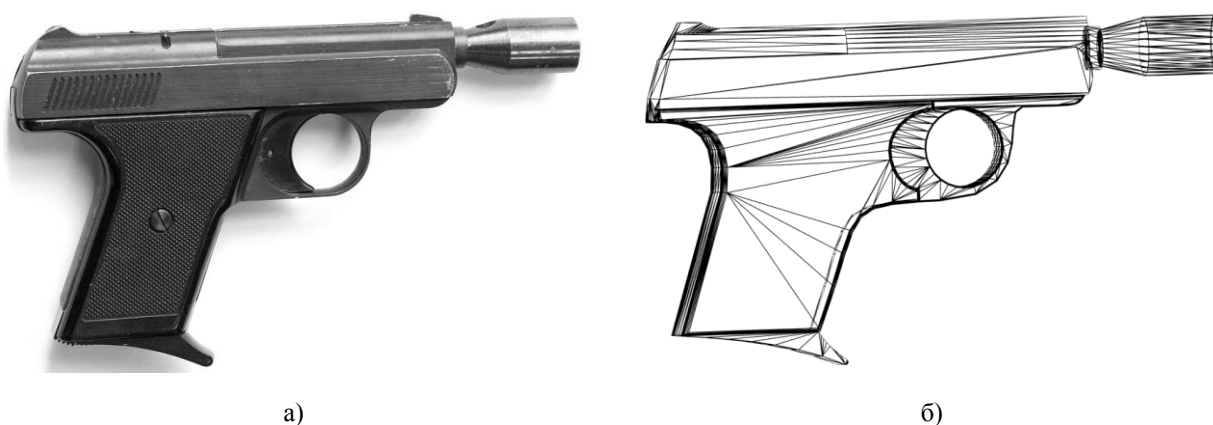


Рис. 1. Газовый пистолет: а) фотография; б) фацетная модель

2.2. Моделирование процесса регистрации радиоголограммы

Процесс получения радиоизображения зондируемых объектов заключается в регистрации и последующем восстановлении комплексной радиоголограммы объекта. Регистрация радиоголограммы заключается в облучении объекта когерентным сигналом и измере-

нии комплексной амплитуды отраженного от объекта сигнала на плоской апертуре. В радиолокаторах [3, 4], в интересах проектирования которых разрабатывалась данная модель, данная процедура осуществляется путем ручного перемещения приемо-передающей антенны радиолокатора по плоской поверхности, называемой плоскостью сканирования (рис. 2). На рисунке координаты (x', y', z') отмечают точку на обращенной к антенне поверхности обследуемого объекта, а координаты (x, y, z_0) отвечают за текущее положение приемо-передающей антенны (антенна считается точечным объектом).

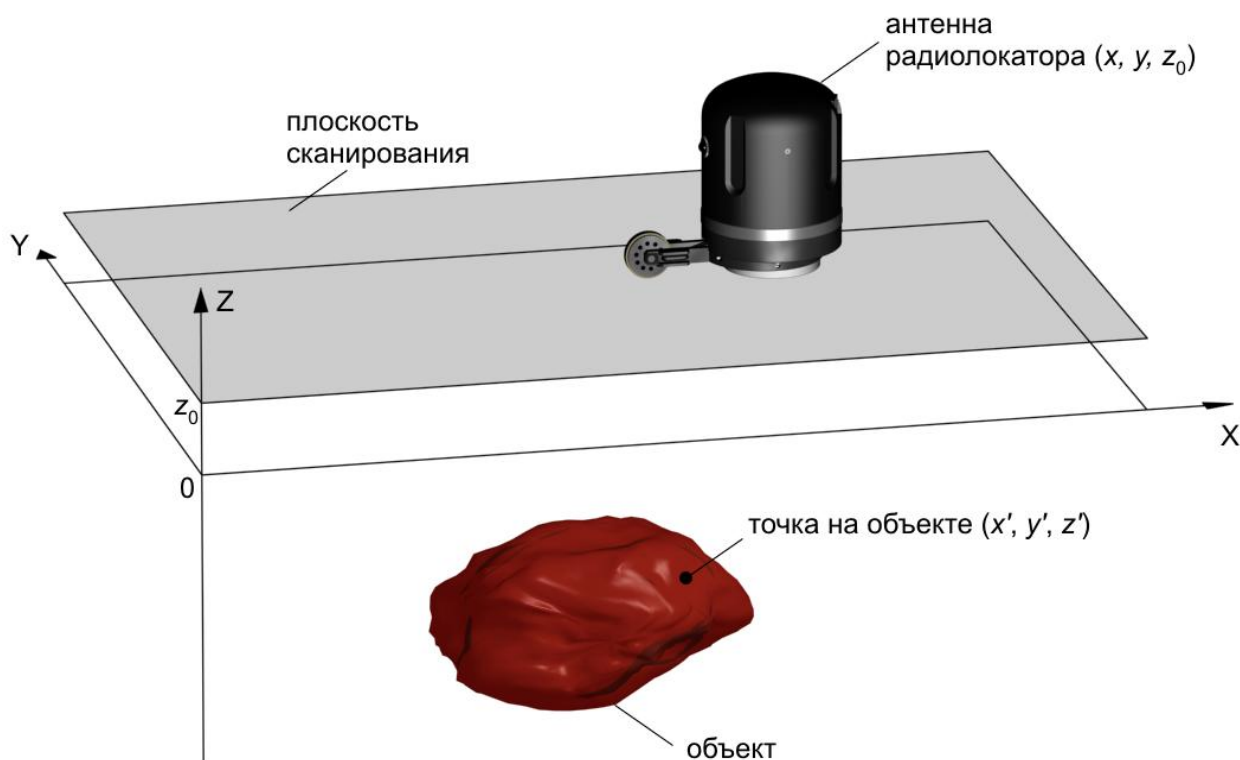


Рис. 2. Конфигурация системы для регистрации радиоголограмм

Если объект характеризуется его функцией отражения $d(x', y', z')$, то комплексную амплитуду сигнала, зарегистрированного приемником на частоте f в точке плоскости сканирования с координатами (x, y, z_0) , можно представить в виде суперпозиции отражений от каждой точки объекта и множителя, описывающего задержку отраженной волны по сравнению с опорной [21]:

$$E(x, y, f) = E_0 \iiint g^2(f, \theta(\mathbf{r}_{\text{TR}}, \mathbf{r}_{\text{OBJ}})) \cdot d(\mathbf{r}_{\text{OBJ}}) \frac{\exp(-i \cdot 2 \cdot k \cdot |\mathbf{r}_{\text{TR}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}|)}{|\mathbf{r}_{\text{TR}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}|^2} dx' dy' dz', \quad (1)$$

где E_0 — комплексная амплитуда возбуждения передатчика; $\mathbf{r}_{\text{TR}} = \|x, y, z_0\|^T$ — вектор координат приемо-передающей антенны; $\mathbf{r}_{\text{OBJ}} = \|x', y', z'\|^T$ — вектор координат локальной точки на поверхности объекта; $|\mathbf{r}|$ — символ длины (модуля) вектора $\mathbf{r}$;

$\theta(\mathbf{r}_{\text{TR}}, \mathbf{r}_{\text{OBJ}}) = \arctg\left(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} / |z_0 - z'|\right)$ — угол между нормалью к плоскости сканирования и направлением из точки приемо-передатчика на локальную точку на поверхности объекта; $k = 2\pi f \sqrt{\varepsilon} / c$ — волновое число; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится объект; c — скорость света; $g(f, \theta)$ — диаграмма направленности (ДН) приемо-передающей антенны в направлении на локальную точку на поверхности объекта, имеющая, например, для приемо-передающего элемента в форме открытого конца круглого волновода следующий вид [1]:

$$g(f, \theta) = (1 + \cos \theta) \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin \theta)}{k \cdot a \cdot \sin \theta}, \quad (2)$$

где a — радиус волновода, $J_1(\xi)$ — функция Бесселя первого рода. Отметим, что ДН учитывается как при передаче, так и при приеме сигнала.

При расчетах отраженного поля голографируемый объект описывался плотной совокупностью точечных отражателей, координаты которых в плоскости сканирования соответствовали узлам двумерной сетки с достаточно мелким шагом. То есть использовался некоторый аналог описанной выше модели «блестящих» точек, но блестящими считались все точки поверхности, а не только точки изломов. При расчетах отраженного поля использовалась модель однократного рассеяния, не учитывающая переотражение и взаимное влияние точечных элементов, а значение локальной ДН каждого точечного элемента в направлении на антенну полагались равным косинусу угла между нормалью к локальной точке поверхности и этим направлением.

Преобразование фацетной модели объекта в массив точечных отражателей, описывающих его поверхность, осуществлялось следующим образом. Задавалась двумерная сетка, параллельная плоскости сканирования, размер которой выбирался с таким расчетом, чтобы она перекрывала весь объект обследования. Предварительные эксперименты по компьютерному моделированию радиоголограмм объектов, для которых существуют аналитические решения, показали, что шаг сетки должен быть как минимум на порядок меньше длины волны зондирующего сигнала, в этом случае массив отражателей адекватно описывает сплошную поверхность. Так как моделирование проводилось для частот в районе 15 ГГц (длина волны 20 мм), то шаг был выбран равным одной десятой длины волны, т.е. 2 мм.

Для каждого узла двумерной сетки с координатами (x, y) проводился поиск фацета, находящегося под узлом, и в случае наличия такого фацета вычислялась координата z пересечения фацета с нормалью к плоскости сканирования, опущенной из узла сетки. Таким образом, формировался массив координат точечных отражателей, в котором для каждого отражателя дополнительно сохранялась информация о направлении нормали в данной точке поверхности. Необходимо отметить, что учитывались только те фацеты, z -координата нормали к которым была больше нуля, т.е. образующие верхнюю, обращенную к антенне поверхность объекта.

На рис. 3 приведена модель пистолета в виде массива точечных отражателей.

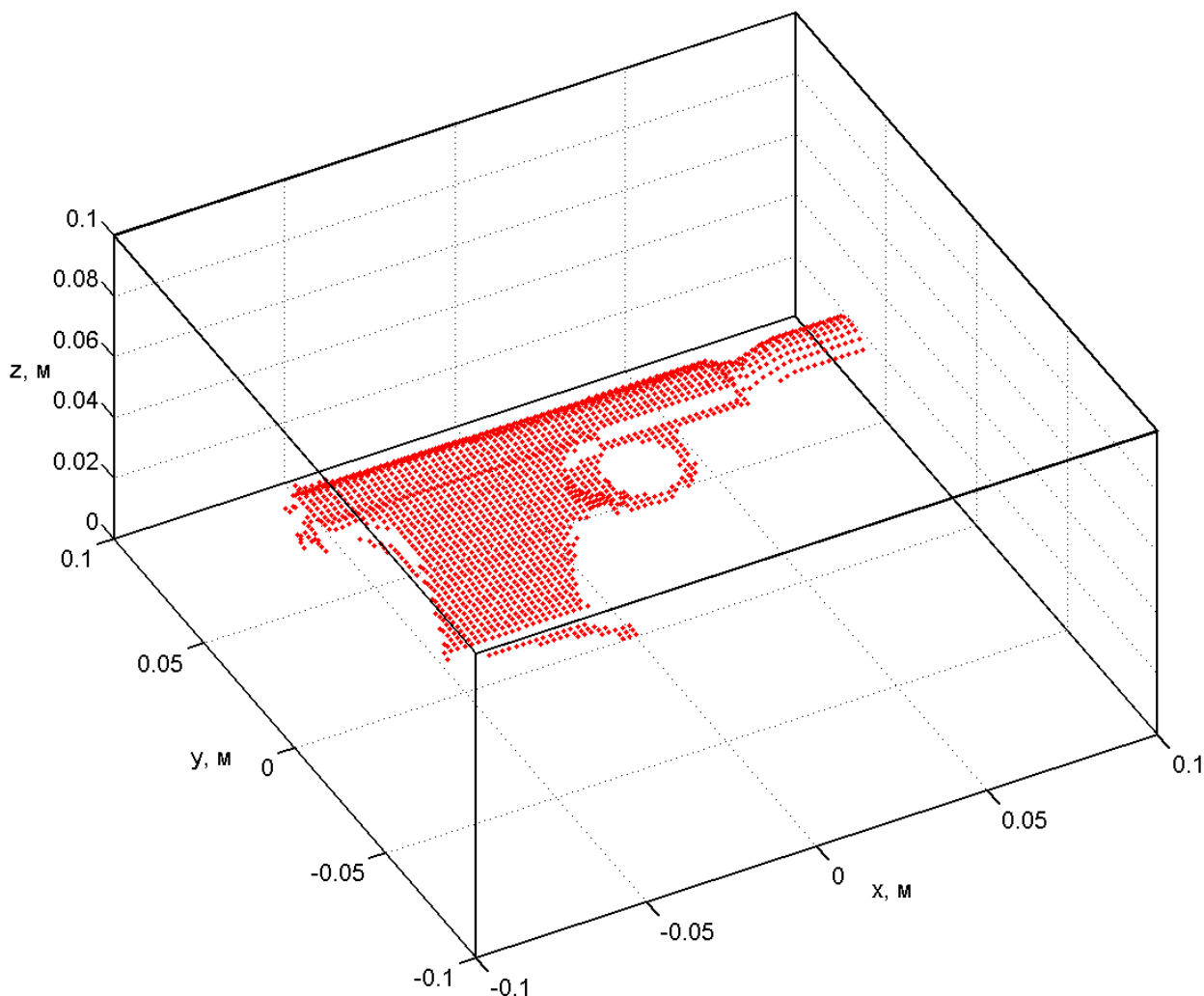


Рис. 3. Модель газового пистолета в виде массива точечных отражателей

В случае представления объекта в виде массива точечных отражателей при моделировании радиоголограммы трехмерный интеграл в (1) заменяется суммой по всем отражателям:

$$E(x, y, f) = E_0 \sigma \sum_{j=1}^{N_{PS}} \left[g^2(f, \theta(\mathbf{r}_{TR}, \mathbf{r}_j)) \cdot \cos(\theta(\mathbf{r}_{TR}, \mathbf{r}_j)) \cdot \frac{\exp(-i \cdot 2 \cdot k \cdot |\mathbf{r}_{TR} - \mathbf{r}_j|)}{|\mathbf{r}_{TR} - \mathbf{r}_j|^2} \right], \quad (3)$$

где N_{PS} — количество точечных отражателей, описывающих объект;

$\theta(\mathbf{r}_{TR}, \mathbf{r}_j) = \arctg\left(\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} / |z_0 - z_j|\right)$ — угол между нормалью к плоскости

сканирования и направлением из точки приемо-передатчика на j -й точечный отражатель;

$\mathbf{r}_j = \|x_j, y_j, z_j\|^T$ — вектор координат j -го точечного отражателя; σ — эффективная площадь рассеяния точечного отражателя, которая при моделировании принималась равной единице и была введена в формулу (3) только для соблюдения размерности.

Если сцена состояла из нескольких объектов, изготовленных из разных материалов (например, оружие на теле человека), то каждому объекту назначался дополнительно коэффициент отражения, определяющийся соотношением диэлектрических проницаемостей объекта и среды.

3. Методы восстановления радиоголограмм

Для получения радиоизображения обследуемого объекта зарегистрированная радиоголограмма должна быть подвергнута процедуре восстановления. Необходимо отметить, что из-за дифракционных эффектов, возникающих при взаимодействии электромагнитной волны с объектом, в результате восстановления радиоголограммы получается не форма объекта, как при восстановлении оптической голограммы, а функция, описывающая отражательную способность объекта и являющаяся отношением амплитуд отраженной и падающей волн. В большинстве случаев по виду этой функции можно легко определить форму объекта.

Методы восстановления подробно рассмотрены в [11] и [12], здесь приведем только финальные соотношения.

3.1. Восстановление одночастотных радиоголограмм

Метод восстановления одночастотных радиоголограмм является методом обратного распространения, который заключается в решении комплексно сопряженного волнового уравнения с использованием зарегистрированной комплексной амплитуды в качестве граничного условия. Этот метод может быть реализован с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье [12]. Формулы (4)–(6) описывают процесс восстановления одночастотной радиоголограммы и формирование радиоизображения обследуемого объекта в плоскости, параллельной плоскости сканирования и удаленной от нее на расстояние z_0 , равное предполагаемому расстоянию до объекта:

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint E(x, y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy, \quad (4)$$

$$S(k_x, k_y, z_0) = F(k_x, k_y) \exp(i\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \cdot z_0), \quad (5)$$

$$E_R(x, y, z_0) = \iint S(k_x, k_y, z_0) \exp(i(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y, \quad (6)$$

где $E(x, y)$ — одночастотная радиоголограмма на частоте f ; $E_R(x, y, z_0)$ — восстановленное радиоизображение при фокусировке на расстояние z_0 ; k_x и k_y — пространственные частоты, соответствующие координатам x и y .

Для вычисления по формуле (4) пространственного спектра $F(k_x, k_y)$ зарегистрированной на расстоянии z_0 от объекта радиоголограммы используется алгоритм двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ). Выражение (5) преобразует полученный спектр $F(k_x, k_y)$ в спектр $S(k_x, k_y, z_0)$ на расстоянии z_0 , т.е. в плоскости, где находится обследо-

дуемый объект. С помощью (6), с использованием обратного двумерного БПФ, вычисляется восстановленное радиоизображение.

Обычной практикой при применении данного метода является последовательная фокусировка голограмм на плоскостях, отстоящих от плоскости регистрации голограммы на разные расстояния, и выбор изображения, сфокусированного наилучшим образом.

3.2. Восстановление многочастотных радиоголограмм

Метод восстановления многочастотных радиоголограмм является расширением одночастотного метода путем добавления третьей размерности — расстояния, и позволяет получать трехмерные изображения обследуемых объектов. Для этого случая справедливы следующие соотношения [11]:

$$F(k_x, k_y, f) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint E(x, y, f) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy, \quad (7)$$

$$S(k_x, k_y, k_z) = F(k_x, k_y, f) \exp(ik_z z_0), \quad (8)$$

$$E_R(x, y, z) = \iiint S(k_x, k_y, k_z) \exp(i(k_x x + k_y y + k_z z)) dk_x dk_y dk_z, \quad (9)$$

где $E(x, y, f)$ — многочастотная радиоголограмма; $k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ — пространственная частота, соответствующая координате z .

Процесс восстановления многочастотных радиоголограмм аналогичен одночастотному случаю, только по формуле (7) с использованием двумерного БПФ отдельно вычисляются спектры для каждой частоты, а результирующее трехмерное радиоизображение получается по формуле (9) с использованием обратного трехмерного БПФ.

4. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Для проверки разработанной модели радиоголограмма пистолета была получена сначала путем математического моделирования (рис. 4), а затем экспериментально (рис. 5). И при моделировании, и в эксперименте условия регистрации радиоголограммы были следующими: расстояние от плоскости сканирования до объекта — 17 см, размер области сканирования — 45×45 см, шаг сканирования — 0.5 см, частота сигнала — 13.8 ГГц.

Напомним, что для регистрации радиоголограммы нужно выделить комплексную огибающую сигнала, формирующегося в приемнике в результате взаимодействия опорной волны (поступающей из генератора в приемник через направленный ответвитель) и волны, отраженной от объекта. Для этого обычно используют квадратурную обработку сигнала, при этом комплексную огибающую сигнала представляют в виде синфазной и квадратурной составляющих [23].

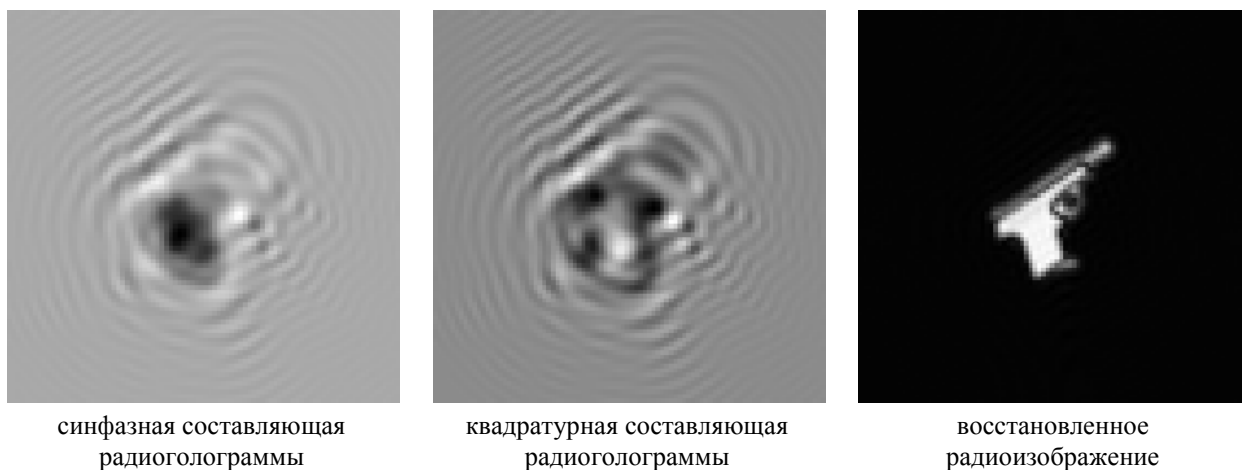


Рис. 4. Моделирование: радиоголограмма 3D-модели пистолета и результат ее восстановления

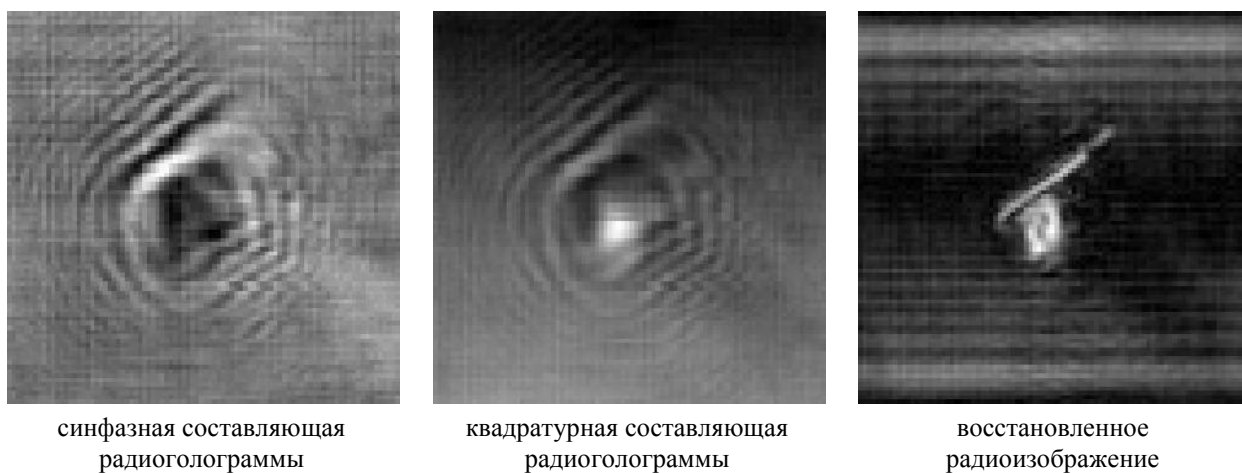


Рис. 5. Эксперимент: радиоголограмма пистолета и результат ее восстановления

Видно, что радиоголограмма, полученная путем моделирования, достаточно хорошо повторяет экспериментальную. Некоторые отличия вызваны тем, что эксперимент проводился не в безэховой камере, а в обычном помещении (рис. 6), и на экспериментальной радиоголограмме, кроме отражений от объекта обследования, также присутствуют отражения от посторонних предметов.



Рис. 6. Стенд для проведения эксперимента

В качестве еще одного примера приведем радиоголограммы манекена человека с расположенным на поясе пистолетом. Размер области сканирования (Ш×В) — 100×112 см, шаг сканирования — 0.5 см, частота — 13.8 ГГц.

Для создания трехмерной модели такого сложного объекта, как манекен человека, требуется очень много времени, поэтому для расчетов использовалась модель человека, найденная в интернете [24]. Она несколько отличается от манекена, с которым проводились эксперименты, в частности, расположением рук и ориентацией головы. Поэтому напрямую сравнивать результаты моделирования (рис. 7) и эксперимента (рис. 8) нельзя, однако видно, что если принять во внимание указанные отличия, то обе радиоголограммы весьма похожи.

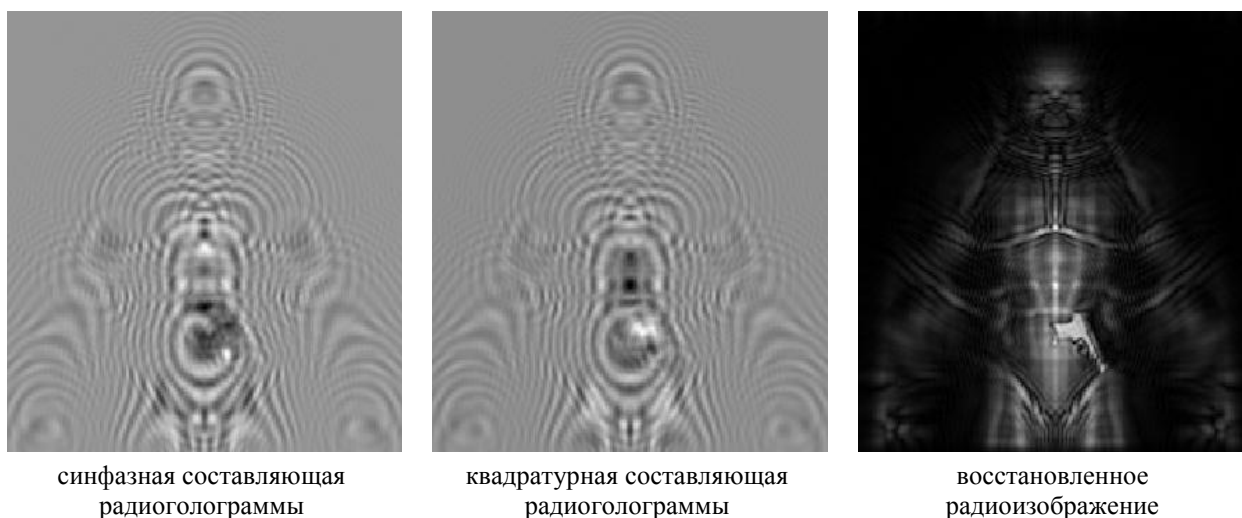


Рис. 7. Моделирование: радиоголограмма 3D-модели манекена и результат ее восстановления

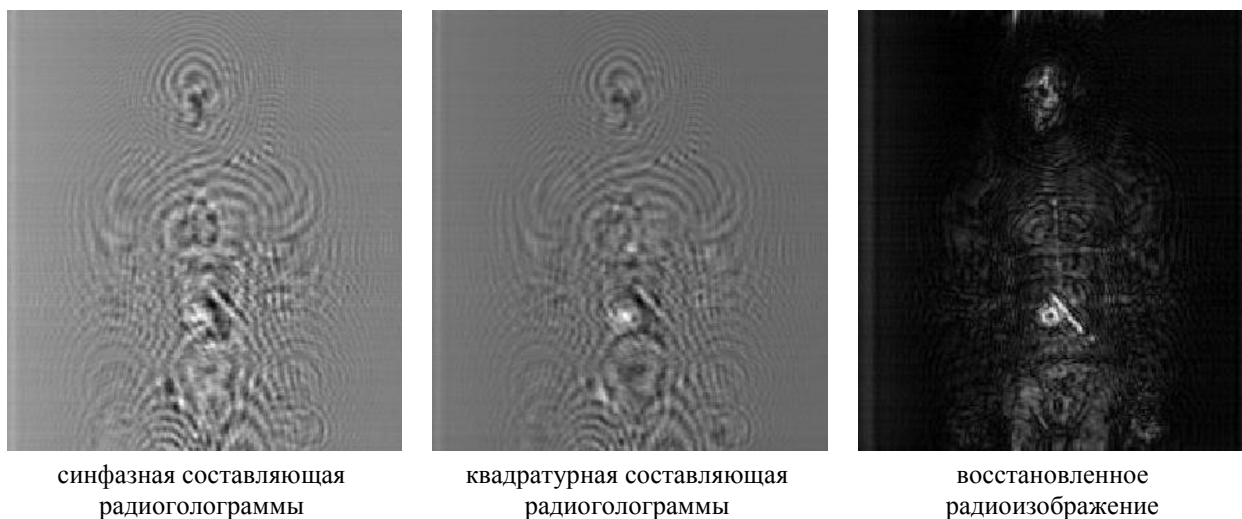


Рис. 8. Эксперимент: радиоголограмма манекена и результат ее восстановления

Отметим, что приведенные на рис. 7 и 8 восстановленные радиоизображения получены для плоскости, находящейся на расстоянии от плоскости сканирования, равному расстоянию до пистолета. Поэтому на этих радиоизображениях пистолет сфокусирован

(что и требовалось получить, т.к. он является объектом поиска), а сам манекен, находящийся несколько дальше от плоскости сканирования, получился размытым.

Заключение

В данной работе предложена модель представления поверхности произвольного объекта в виде набора плотно расположенных точечных отражателей, а также технология моделирования процесса регистрации радиоголограмм радиолокаторами малой и сверхмалой дальности.

Безусловно, с помощью этой модели нельзя получить распределение токов по поверхности объекта и поле вблизи поверхности рассеяния, но сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными показало адекватность модели при вычислении радиоголограмм различных объектов.

Модель может быть использована для получения зависимости разрешения в плоскости зондирования от используемой частоты, шага сканирования и расстояния до объекта, зависимости разрешения по дальности от используемой полосы частот, для оценки размера области сканирования, диапазона однозначных дальностей, степени деградации восстанавливаемых изображений при увеличении расстояния между передающей и приемной антеннами и для ответа на другие вопросы, возникающие при проектировании радиолокаторов малой и сверхмалой дальности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №13-07-00470 и №12-07-00557).

Список литературы

1. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Антенны. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. 130 с.
2. Еремин Ю.А., Зимнов М.Х., Кюркчан А.Г. Теоретические методы анализа характеристик рассеяния электромагнитных волн. Стационарные задачи // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 1. С. 14–31.
3. Журавлев А.В., Ивашов С.И., Бугаев А.С., Разевиг В.В., Васильев И.А. Разработка методов, основанных на регистрации и восстановлении голографических радиолокационных изображений СВЧ диапазона, для создания высокопроизводительных железнодорожных терминалов досмотра пассажиров // Третья российская конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ'12 (Москва, 16-19 апреля 2012 г.): тр. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 321–333. Режим доступа: http://cmm.ipu.ru/sites/default/cmm12cd/CD/Papers/report_pdfed.pdf (дата обращения 01.05.2014).

4. Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В., Разевиг В.В. Разработка технологии голографических подповерхностных радиолокаторов и ее применение // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 1–2. С. 5–18.
5. Мэрдок К. Autodesk 3ds Max 2013. Библия пользователя: пер. с англ. М.: Диалектика, 2013. 816 с.
6. Нотт Е.Ф., Сеньор Т. Сравнение трех методов, применяемых в высокочастотной теории дифракции // ТИИЭР. 1974. Т. 62, № 11. С. 63–71. [Knott E.F., Senior T.B.A. Comparison of three high-frequency diffraction techniques // Proc. IEEE. 1974. Vol. 62, no. 11. P. 1468-1474. DOI: [10.1109/PROC.1974.9653](https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9653)].
7. Олюнин Н.Н. Фасеточная модель в задачах рассеяния электромагнитных волн на телах с импедансной поверхностью // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 2. С. 84–91.
8. Петров Д.Ю. Математическое моделирование дифракции электромагнитных волн на телах сложной формы и некоторые его приложения: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2002. 171 с.
9. Потехин А.И. Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн. М.: Советское радио, 1948. 136 с.
10. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь, 1985. 236 с.
11. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В. Влияние ширины полосы частот на качество восстановления подповерхностных радиоголограмм // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 3. С. 3–13.
12. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В. Восстановление микроволновых голограмм, полученных подповерхностным радиолокатором РАСКАН // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 51–58.
13. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
14. Чапурский В.В. Синтезирование радиоизображений объектов с помощью линейной антенной решетки типа ММО // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 8. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/323.html> (дата обращения 01.05.2014).
15. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
16. Юсеф Н.Н. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных целей // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 5. С. 100–112. [Youssef N.N. Radar cross section of complex targets // Proc. IEEE. 1989. Vol. 77, iss. 5. P. 722-734. DOI: [10.1109/5.32062](https://doi.org/10.1109/5.32062)].
17. De Lano R.H. A Theory of Target Glint or Angular Scintillation in Radar Tracking // Proc. IRE. 1953. Vol. 41, no. 4. P. 61–63.
18. Gunes O., Buyukozturk O. Simulation-based microwave imaging of plain and reinforced concrete for nondestructive evaluation // International Journal of the Physical Sciences. 2012. Vol. 7, no. 3. P. 383–393.

19. Qi Y. L., Tan W. X., Wang Y. P., Hong W., Wu Y. R. 3D bistatic Omega-K imaging algorithm for near range microwave imaging systems with bistatic planar scanning geometry // Progress in Electromagnetics Research. 2011. Vol. 121. P. 409–431.
20. Qi Y., Wang Y., Tan W., Hong W. Application of sparse array and MIMO in near-range microwave imaging // Proc. SPIE 8179, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XI. 2011. P. 81790X-1–81790X-12. DOI: [10.1117/12.898071](https://doi.org/10.1117/12.898071)
21. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, no. 9. P. 1581-1592. DOI: [10.1109/22.942570](https://doi.org/10.1109/22.942570)
22. Wang L., Al-Jumaily A. M., Simpkin R. Holographic Microwave Imaging Array for Brain Stroke Detection // Journal of Signal and Information Processing. 2013. No. 4. P. 96–101.
23. Zhang Z.Q., Liu Q.H., Xiao C., Ward E., Ybarra G., Joines W.T. Microwave breast imaging: 3-D forward scattering simulation // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003. Vol. 50, no. 10. P. 1180–1189. DOI: [10.1109/TBME.2003.817634](https://doi.org/10.1109/TBME.2003.817634)
24. 3D Model - Dante Naked // graphixshare: website. Available at: <http://www.graphixshare.com/3d/406115-3d-model-dante-naked.html> , accessed 01.05.2014.

Simulation of recording the microwave holograms of complex objects by the near range radars

06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0712294

V.V. Razevig

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

vrazevig@rslab.ru

Radar is an object-detection technology that uses radio waves to determine the presence, range, altitude, direction, or speed of objects. In the recent time, there is an increasingly arising interest to the near range microwave imaging that allows detection of the shape and, in some cases, the inner structure of the investigated objects.

For design engineering and efficiency evaluation of the cutting-edge radars as well as for testing the developed recovery algorithms a set of microwave holograms of various objects obtained under different conditions is needed. Microwave holograms cannot be obtained only on the basis of the experimental researches related to the measurements of electromagnetic scattering by the real objects since such experiments are time consuming and quite expensive. Therefore, to simulate electromagnetic scattering processes via objects examination is quite a challenge.

This investigation goal is to develop a computer simulation method to record the microwave holograms of complex objects by the near range radars

To specify the shape of the investigated objects, Autodesk 3ds Max (3D computer graphics program for making 3D animations, models, and images) is used. At a second stage the surface of the created object is described by a set of triangular facets. While calculating the reflected field, a final representation of the object as a set of point reflectors is used. Thus, the model of single scattering, is used without taking into consideration re-reflection and cross-influence of reflectors.

Methods are also described to form the focused images of the microwave holograms that allow us to obtain a function describing object reflectivity, by which in most cases an object shape can be easily recognized

A comparison of computer-simulated holograms with experimental data proves the model adequacy.

The model can be used to find a dependence of the plane resolution on used frequency, step of scanning, and distance to the object and a dependence of the range resolution on the used

frequency band. It can be also used for estimation of the aperture size and unambiguous range and to answer the other questions arising in designing the near range radars.

Publications with keywords: [mathematical modeling](#), [Microwave hologram](#), [holorgam reconstruction](#), [point reflector](#), [facet model](#)

Publications with words: [mathematical modeling](#), [Microwave hologram](#), [holorgam reconstruction](#), [point reflector](#), [facet model](#)

References

1. Goshin G.G. *Ustroystva SVCh i anteny. V 2 ch. Ch. 2. Anteny* [Microwave devices and antennas. In 2 parts. Pt. 2. Antennas]. Tomsk, Tomsk Interuniversity Center for Distance Education Publ., 2003. 130 p. (in Russian).
2. Eremin Yu.A., Zimnov M.Kh., Kyurkchan A.G. [Theoretical methods for analyzing characteristics of scattering of electromagnetic waves. Stationary problems]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1992, vol. 37, no.1, pp. 14–31. (in Russian).
3. Zhuravlev A.V., Ivashov S.I., Bugaev A.S., Razevig V.V., Vasil'ev I.A. [Development of methods based on registration and restoration of holographic radar images of microwave range, to create high performance passenger screening rail terminals]. *Tret'ya Rossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya" UKI'12: tr.* [Proc. of the Third Russian conference with international participation "Hardware and software for systems of management, control and measurement" UKI'12], 16-19 April 2012, Moscow. Moscow, Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2012, pp. 321–333. Available at: http://cmm.ipu.ru/sites/default/cmm12cd/CD/Papers/report_pdfed_.pdf, accessed 01.05.2014. (in Russian).
4. Ivashov S.I., Vasil'ev I.A., Zhuravlev A.V., Razevig V.V. [Holographi subsurface radar technique and its applications]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2009, no. 1–2, pp. 5–18. (in Russian).
5. Murdock K.L. *Autodesk 3ds Max 2013 Bible*. Wiley, 2012. 840 p. (Russ. ed.: Murdock K.L. *Autodesk 3ds Max 2013. Bibliya pol'zovatelya*. Moscow, Dialektika Publ., 2013. 816 p.).
6. Knott E.F., Senior T.B.A. Comparison of three high-frequency diffraction techniques. *Proc. IEEE*, 1974, vol. 62, no. 11, pp. 1468-1474. DOI: [10.1109/PROC.1974.9653](https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9653)
7. Olyunin N.N. [Facet model in problems of electromagnetic scattering by impedance bodies]. *Trudy MFTI - Proceedings of MIPT*, 2009, vol. 1, no. 2, pp. 84–91. (in Russian).

8. Petrov D.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie difraktsii elektromagnitnykh voln na telakh slozhnoy formy i nekotorye ego prilozheniya*. Kand. diss. [Mathematical modeling of electromagnetic wave diffraction by bodies of complex shape and some of its applications. Cand. diss.]. Moscow, 2002. 171 p. (in Russian).
9. Potekhin A.I. *Nekotorye zadachi difraktsii elektromagnitnykh voln* [Some problems of electromagnetic wave diffraction]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1948. 136 p. (in Russian).
10. Varganov M.E., Zinov'ev Yu.S., Astanin L.Yu., et al. *Radiolokatsionnye kharakteristiki letatel'nykh apparatov* [Radar characteristics of aircraft]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 236 p. (in Russian).
11. Razevig V.V., Bugaev A.S., Ivashov S.I., Vasil'ev I.A., Zhuravlev A.V. [Influence of frequency bandwidth on reconstruction quality of subsurface microwave holograms]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2012, no. 3, pp. 3–13. (in Russian).
12. Razevig V.V., Bugaev A.S., Ivashov S.I., Vasil'ev I.A., Zhuravlev A.V. [Reconstruction of microwave holograms recorded by the RASCAN subsurface radar]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2010, no. 9, pp. 51–58. (in Russian).
13. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p. (in Russian).
14. Chapurskiy V.V. [Object radio image synthesizing by means of linear antenna array of the MIMO series]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii - Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 8. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/323.html> , accessed 01.05.2014. (in Russian).
15. Shtager E.A. *Rasseyaniye radiovoln na telakh slozhnoy formy* [Scattering of radio waves in solids of complex shape]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 184 p. (in Russian).
16. Youssef N.N. Radar cross section of complex targets. *Proc. IEEE*, 1989, vol. 77, iss. 5, pp. 722–734. DOI: [10.1109/5.32062](https://doi.org/10.1109/5.32062)
17. De Lano R.H. A Theory of Target Glint or Angular Scintillation in Radar Tracking. *Proc. IRE*, 1953, vol. 41, no. 4, pp. 61–63.
18. Gunes O., Buyukozturk O. Simulation-based microwave imaging of plain and reinforced concrete for nondestructive evaluation. *International Journal of the Physical Sciences*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 383–393.
19. Qi Y. L., Tan W. X., Wang Y. P., Hong W., Wu Y. R. 3D bistatic Omega-K imaging algorithm for near range microwave imaging systems with bistatic planar scanning geometry. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 121, pp. 409–431.

20. Qi Y., Wang Y., Tan W., Hong W. Application of sparse array and MIMO in near-range microwave imaging. *Proc. SPIE* 8179, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XI, 2011, pp. 81790X-1–81790X-12. DOI: [10.1117/12.898071](https://doi.org/10.1117/12.898071)
21. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, vol. 49, no. 9, pp. 1581-1592. DOI: [10.1109/22.942570](https://doi.org/10.1109/22.942570)
22. Wang L., Al-Jumaily A. M., Simpkin R. Holographic Microwave Imaging Array for Brain Stroke Detection. *Journal of Signal and Information Processing*, 2013, no. 4, pp. 96–101.
23. Zhang Z.Q., Liu Q.H., Xiao C., Ward E., Ybarra G., Joines W.T. Microwave breast imaging: 3-D forward scattering simulation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, vol. 50, no. 10, pp. 1180–1189. DOI: [10.1109/TBME.2003.817634](https://doi.org/10.1109/TBME.2003.817634)
24. 3D Model - Dante Naked. Graphixshare: website. Available at: <http://www.graphixshare.com/3d/406115-3d-model-dante-naked.html> , accessed 01.05.2014.