На правах рукописи

**Разевиг Владимир Всеволодович**

# КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

Специальности: 05.13.18 — Математические моделирование,
численные методы и комплексы программ
05.12.14 — Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук **Ивашов Сергей Иванович**

**Научный консультант:** доктор физико-математических наук, доцент **Ткачев Сергей Борисович**

**Калошин Вадим Анатольевич**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», заведующий лабораторией электродинамики

**Иванов Дмитрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет», проректор по научной работе и инновационной деятельности

**Ведущая организация:** федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Защита состоится «____» _____ 2016 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, Рубцовская наб., 2/18, ауд. 1006 л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (www.bmstu.ru) Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент Аттетков Александр Владимирович

## *Общая характеристика работы*

**Актуальность темы.** 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 дальности, позволяющая определять форму и, в некоторых случаях, внутреннюю структуру зондируемых объектов, непрозрачных в видимом диапазоне длин волн.

Одним из существующих на сегодняшний день приложений радиолокации малой дальности является подповерхностная радиолокация как средство неразрушающего контроля строительных конструкций с целью обнаружения скрытых предметов (проводов, арматуры, различных неоднородностей и инородных тел). Также радиолокационные методы широко используются в системах досмотра пассажиров, предназначенных для обнаружения запрещенных к проносу предметов.

Одним из возможных методов получения изображений объектов в непрозрачных в оптическом диапазоне средах является регистрация их радиоголограмм. В этом случае 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 алгоритмов.

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 является задача моделирования процессов рассеяния электромагнитных волн объектами исследования**.

Аналитическое решение задачи рассеяния существует только для ограниченного набора простых тел, таких как плоскость, цилиндр, сфера, клин, во всех остальных случаях используют численные методы.

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Основная проблема использования существующих в настоящее время численных методов заключается в их алгоритмической и вычислительной сложности, при этом задача нахождения поля рассеяния каждого объекта исследования превращается в самостоятельную задачу. Из-за этого в работах, посвященных математическому моделированию в области радиолокации малой дальности, в качестве объекта исследования обычно выступает набор отдельных точечных рассеивателей. Однако реальные объемные объекты имеют сплошную поверхность, для которой должны применяться соответствующие аппроксимации. Таким образом, разработка эффективных методов математического моделирования процесса регистрации и восстановления радиоголограмм объектов сложной формы в радиолокации малой дальности является **актуальной задачей**.

**Цель диссертационной работы** — разработка и реализация на ЭВМ метода математического моделирования процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой дальности, разработка методов и алгоритмов восстановления радиоголограмм, исследование с использованием предложенной модели различных вариантов построения радиолокационных систем малой дальности, а также создание программного обеспечения (ПО) для подповерхностных радиолокаторов серии РАСКАН-5.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач**:

– разработка и обоснование модели рассеяния электромагнитной волны на объектах сложной формы;

– выбор способа описания поверхности обследуемых объектов;

– разработка алгоритмов преобразования фацетной модели объекта в модель точечных рассеивателей;

– разработка алгоритмов и создание ПО для моделирования процесса регистрации радиоголограмм объектов произвольной формы радиолокационными системами различной конфигурации;

– разработка алгоритмов для восстановления радиоголограмм;

– разработка протокола обмена данными с блоком управления радиолокатора РАСКАН-5, определение необходимого функционала ПО и выбор среды разработ-

ки, адаптация разработанных алгоритмов восстановления радиоголограмм под данный радиолокатор.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые научные результаты, которые выносятся на защиту:

1. Методика моделирования электромагнитного поля, рассеянного объектами сложной формы, основанная на аппроксимации поверхности объекта плотным массивом точечных рассеивателей. Численные алгоритмы восстановления радиоизображений по данным радиоголографического зондирования.

2. Теоретическое обоснование возможности использования в радиолокаторах малой дальности разреженных антенных решеток, работающих по принципу Multiple Input — Multiple Output (MIMO), с уменьшенным количеством приемных и передающих элементов.

3. Теоретическое обоснование возможности использования комбинированной системы с инверсным синтезированием апертуры в радиолокационном канале и времяпролетной камерой в оптическом канале для досмотра свободно передвигающихся людей.

4. Программный комплекс для управления радиолокатором РАСКАН-5 и восстановления регистрируемых им радиоголограмм.

**Практическая значимость** диссертационной работы связана с ее прикладной ориентацией, а разработанная в ней методика математического моделирования электромагнитного поля позволяет оперативно моделировать процесс регистрации радиоголограмм объектов произвольной формы для различных вариантов построения радиолокационных систем малой дальности, т.е. для различных частот, расстояний до объекта, конфигураций антенных систем, шагов сканирования и прочее в целях выбора оптимальной конфигурации системы для решения конкретной задачи. Программный комплекс, реализующий разработанные алгоритмы восстановления радиоголограмм, позволяет обрабатывать экспериментальные данные в режиме реального времени, получая радиоизображения зондируемых объектов. Программный комплекс входит в комплект поставки подповерхностных радиолокаторов РАСКАН.

Результаты диссертационной работы использованы ФГУП «НПО «Техномаш» (Роскосмос) при выполнении опытно-конструкторской работы «Прогресс». На ос-

новании выполненных совместных исследований получен патент на изобретение «Способ дефектоскопии теплозащитных и теплоизоляционных покрытий изделий» (патент № 2532414 Рос. Федерация; 10.11.2014).

**Методы исследования.** При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные классы методов: теории распространения, дифракции и отражения радиоволн, обработки сигналов, численного анализа математических моделей электродинамики сплошных сред.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов** гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов, полученных с использованием вычислительных экспериментов, с известными с аналитическими решениями и результатами экспериментов. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путем их содержательного анализа, так и методами математического моделирования.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались на Международном симпозиуме по обороне и безопасности (Балтимор, США, 2014), Международном симпозиуме по электронным методам формирования изображений (Сан-Франциско, США, 2015), X Всероссийской научно-технической конференции (Пенза–Заречный, 2014), Международной конференции по радиолокаторам (Сиань, Китай, 2013), XIV международной конференции по подповерхностной радиолокации (Шанхай, Китай, 2012), III Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ'12 (Москва, 2012).

Диссертация является составной частью фундаментальных исследований, проводимых в рамках грантов РФФИ № 09-07-00061, № 09-07-13502, № 10-07-00490, № 11-07-00204, № 11-07-13117-офи-м-2011-РЖД, № 12-07-00557, № 12-07-12015-офи_м, № 12-07-91371-СТ_а, № 13-07-00470, проекта № 14.B37.21.1929 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» и НИР № 8.1211.2014/К, выполняемой в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, в том числе в 6 статьях из Перечня ведущих рецензируемых на-

учных журналов и изданий, 9 трудах Международных и Российских конференций и 4 патентах на изобретения.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных работ в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 123 страницах, содержит 94 иллюстрации и 1 таблицу. Список литературы включает 69 наименований.

### *Содержание работы*

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

**Первая глава** посвящена феноменологической модели пространственно-протяженных объектов, предназначенной для моделирования радиоголографических систем. Процесс получения радиоизображений зондируемых объектов заключается в регистрации комплексной радиоголограммы объекта и последующем ее восстановлении. Регистрация радиоголограммы происходит путем облучения объекта когерентным сигналом и измерения комплексной амплитуды отраженного от объекта сигнала на некоторой поверхности, называемой плоскостью регистрации радиоголограммы или апертурой.

Для моделирования процесса регистрации радиоголограммы нужно создать модель наблюдаемого объекта и решить задачу электромагнитного рассеяния на этом объекте. На Рис. 1 приведена геометрия системы для регистрации радиоголограмм.

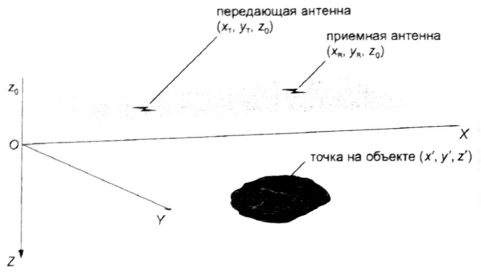



Рис. 1. Геометрия системы для регистрации радиоголограмм

Если объект характеризуется его функцией отражения $Q(\mathbf{r}_{\text{OBJ}})$, где $\mathbf{r}_{\text{OBJ}} = [x', y', z']^T$ — вектор координат локальной точки на поверхности обследуемого объекта, то комплексную амплитуду сигнала, зарегистрированного приемным элементом на частоте $f$ в точке, задаваемой вектором $\mathbf{r}_{\text{R}} = [x_{\text{R}}, y_{\text{R}}, z_0]^T$, при облучении объекта передающим элементом, расположенным в точке, задаваемой вектором $\mathbf{r}_{\text{T}} = [x_{\text{T}}, y_{\text{T}}, z_0]^T$, можно представить в виде суперпозиции отражений от каждой точки объекта с учетом задержки электромагнитной волны при ее распространении от передающего элемента до этой точки и обратно до приемного элемента:

$$E(x_{\text{T}}, y_{\text{T}}, x_{\text{R}}, y_{\text{R}}, f) = E_0 \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} Q(\mathbf{r}_{\text{OBJ}}) \frac{g\left(f, \theta\left(\mathbf{r}_{\text{T}}, \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right)\right) \cdot g\left(f, \theta\left(\mathbf{r}_{\text{R}}, \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right)\right)}{\left|\mathbf{r}_{\text{T}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right| \left|\mathbf{r}_{\text{R}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right|} \times$$
$$\times \exp\left(-i \cdot k\left(\left|\mathbf{r}_{\text{T}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right| + \left|\mathbf{r}_{\text{R}} - \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right|\right)\right) dx'dy'dz',$$

где $E_0$ — комплексная амплитуда возбуждения передатчика; $\theta\left(\mathbf{r}_{\text{T(R)}}, \mathbf{r}_{\text{OBJ}}\right)$ — угол между нормалью к плоскости регистрации и направлением из точки передатчика ($T$) (приемника ($R$)) на локальную точку на поверхности объекта; $k = 2\pi f\sqrt{\varepsilon}/c$ — волновое число; $\varepsilon$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится объект; $c$ — скорость света; $g(f, \theta)$ — диаграмма направленности (ДН) передающей (приемной) антенны в направлении на локальную точку поверхности объекта.

Для расчетов рассеянного объектом поля необходимо знать функцию отражения объекта. В настоящем исследовании предлагается описывать голографируемый

объект плотной совокупностью точечных всенаправленных рассеивателей, каждый из которых имеет собственную эффективную площадь рассеяния. В этом случае при моделировании радиоголограммы тройной интеграл заменяется суммой по всем рассеивателям:

$$E(x_{\mathrm{T}},y_{\mathrm{T}},x_{\mathrm{R}},y_{\mathrm{R}},f)=E_0\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{PS}}}\left[\sigma_j\frac{g\left(f,\theta\left(\mathbf{r}_{\mathrm{T}},\mathbf{r}_j\right)\right)\cdot g\left(f,\theta\left(\mathbf{r}_{\mathrm{R}},\mathbf{r}_j\right)\right)}{\left|\mathbf{r}_{\mathrm{T}}-\mathbf{r}_j\right|\left|\mathbf{r}_{\mathrm{R}}-\mathbf{r}_j\right|}\times\right.$$

$$\left.\times\exp\left(-i\cdot k\left(\left|\mathbf{r}_{\mathrm{T}}-\mathbf{r}_j\right|+\left|\mathbf{r}_{\mathrm{R}}-\mathbf{r}_j\right|\right)\right)\right],$$

где $N_{\mathrm{PS}}$ — количество описывающих объект точечных рассеивателей; $\mathbf{r}_j=\left[x_j,y_j,z_j\right]^T$ — вектор координат $j$-го точечного рассеивателя; $\sigma_j$ — эффективная площадь рассеяния $j$-го точечного рассеивателя, позволяющая задавать для разных областей поверхности объекта разные коэффициенты отражения электромагнитной волны.

Разработана двухэтапная процедура получения модели объекта в виде массива точечных рассеивателей. На первом этапе поверхность реального тела аппроксимируется совокупностью однотипных и пристыкованных друг к другу плоских треугольных элементов — фацетов. На втором этапе для каждого фацета выполняется следующая процедура (Рис. 2):

- вычисление угла $\varphi$ между плоскостью, в которой лежит фацет, и плоскостью $z=0$;
- определение прямой (в случае ее существования), являющейся пересечением плоскости $z=0$ и плоскости, содержащей фацет (прямая задается направляющим вектором $\left[v_x,v_y,v_z\right]^T$ и точкой $\left(x_0,y_0,z_0\right)$);
- формирование матрицы поворота на угол $\varphi$ относительно оси, заданной вектором $\left[v_x,v_y,v_z\right]^T$:

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}cs+(1-cs)v_x^2 & (1-cs)v_xv_y & ss\cdot v_y\\ (1-cs)v_yv_x & (1-cs)v_y^2 & -ss\cdot v_x\\ -ss\cdot v_y & ss\cdot v_x & cs\end{bmatrix},\ \text{где } cs=\cos\varphi,\ ss=\sin\varphi;$$

- поворот фацета в плоскость $z=0$;

– формирование двумерной сетки с достаточно мелким шагом, расположенной относительно фацета таким образом, чтобы один из узлов сетки попадал в центр тяжести треугольника;
– выбор узлов сетки, лежащих внутри фацета, и присвоение их координат точечным рассеивателям.

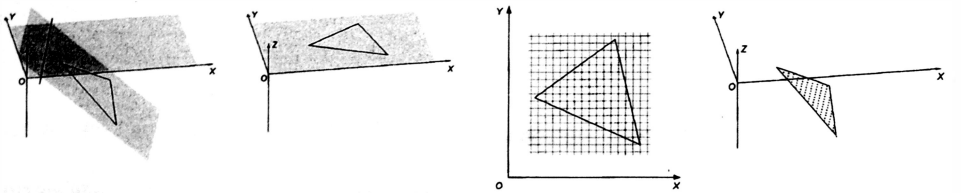
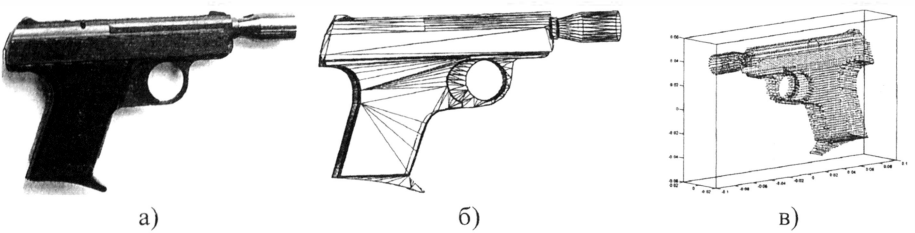


Рис. 2. Иллюстрация процесса аппроксимации фацета точечными рассеивателями

На Рис. 3 приведена фотография (а), фацетное представление (б) и модель в виде массива точечных рассеивателей (в) газового пистолета, являющегося одним из объектов исследований.



а) б) в)

Рис. 3. Газовый пистолет

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию процессов регистрации и восстановления радиоголограмм объектов сложной формы в интересах проектирования голографических подповерхностных радиолокаторов и радиолокаторов для поиска запрещенных к проносу предметов, скрытых под одеждой человека, позволяющей оперативно моделировать радиоголограммы наблюдаемых объектов произвольной формы для различных частот, расстояний до объекта, конфигураций антенных систем, шагов сканирования и пр.

С точки зрения конфигурации антенной системы, с помощью которой регистрируется радиоголограмма, различают моностатическую и мультистатическую радиоголографию.

В моностатическом случае используются эквидистантные неподвижные двумерные или сканирующие линейные антенные решетки (АР), состоящие из совмещенных на передачу и прием (приемо-передающих) антенных элементов.

В мультистатическом случае используются разреженные АР, состоящие из раздельных и распределенных по АР передающих (ПдЭ) и приемных (ПрЭ) элементов. Пространственные отсчеты дифрагированного на объекте электромагнитного поля при этом методе получают для всех возможных бистатических пар «ПдЭ — ПрЭ». При этом количество независимых отсчетов поля равно произведению числа ПдЭ на число ПрЭ и может совпадать с числом отсчетов поля в моностатическом случае при существенно меньшем количестве элементов решетки.

Универсальным методом восстановления радиоголограмм является метод обратных проекций. Если комплексная многочастотная радиоголограмма объекта зарегистрирована с помощью некоторой совокупности ПдЭ и ПрЭ, которые могут располагаться в плоской области регистрации радиоголограммы $z = z_0$ произвольным образом, то значение восстановленного радиоизображения в точке пространства с координатами $\mathbf{r}' = \left[x', y', z'\right]^T$ может быть вычислено по формуле:

$$Q(\mathbf{r}') = \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=F_{\min}}^{F_{\max}}\left[E(\mathbf{r}_{T,n}, \mathbf{r}_{R,m}, f)\cdot\exp\left\{i\frac{2\pi f}{c}\left(\left|\mathbf{r}_{T,n} - \mathbf{r}'\right| + \left|\mathbf{r}_{R,m} - \mathbf{r}'\right|\right)\right\}\right],$$

где $N$ — количество ПдЭ; $M$ — количество ПрЭ; $E(\mathbf{r}_{T,n}, \mathbf{r}_{R,m}, f)$ — значение радиоголограммы, полученное на частоте $f$ при работе пары «$n$-й ПдЭ — $m$-й ПрЭ»; $F_{\min}$ — начальная частота радиолокационного сигнала; $F_{\max}$ — конечная частота радиолокационного сигнала; $\mathbf{r}_{T,n} = \left[x_{T,n}, y_{T,n}, z_0\right]^T$ — вектор координат $n$-го ПдЭ; $\mathbf{r}_{R,n} = \left[x_{R,m}, y_{R,m}, z_0\right]^T$ — вектор координат $m$-го ПрЭ.

Метод не накладывает ограничений на пространственное расположение элементов АС, оно может быть как эквидистантным, так и неэквидистантным. Ситуация, когда $N = M$ и $\mathbf{r}_{T,n} = \mathbf{r}_{R,n}$ для всех $n$, соответствует моностатическому случаю.

Метод обратных проекций является универсальным, он позволяет восстанавливать радиоголограммы, зарегистрированные антенной системой любой конфигурации, однако требует больших вычислительных затрат. Для радиоголограмм, зареги-

стрированных на эквидистантной пространственной сетке, существуют «быстрые» методы восстановления, основанные на преобразовании Фурье.

Одночастотная радиоголограмма $E(x,y)$ может быть восстановлена с помощью метода обратного распространения, который заключается в решении комплексно сопряженного волнового уравнения с использованием зарегистрированной комплексной амплитуды в качестве граничного условия для восстановления распределения источников на произвольно отстоящей плоскости, параллельной плоскости регистрации голограммы. Этот метод может быть реализован с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье:

$$F(k_x,k_y)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}E(x,y)\exp\left\{-i(k_x x+k_y y)\right\}dxdy;$$

$$S(k_x,k_y,z)=F(k_x,k_y)\exp\left\{i\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot(z_0-z)\right\};$$

$$Q(x,y,z)=\int_{-2k}^{2k}\int_{-2k}^{2k}S(k_x,k_y,z)\exp\left\{i(k_x x+k_y y)\right\}dk_x dk_y.$$

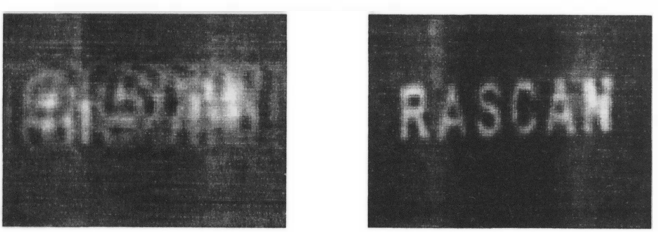
В случае восстановления многочастотной радиоголограммы $E(x,y,f)$ справедливы следующие соотношения:

$$F(k_x,k_y,f)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}E(x,y,f)\exp\left\{-i(k_x x+k_y y)\right\}dxdy;$$

$$S(k_x,k_y,k_z)=F(k_x,k_y,f)\exp\left\{ik_z z_0\right\};\ k_z=\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2};$$

$$Q(x,y,z)=\int_{-2k}^{2k}\int_{-2k}^{2k}\int_{-2k}^{2k}S(k_x,k_y,k_z)\exp\left\{i(k_x x+k_y y+k_z z)\right\}dk_x dk_y dk_z.$$

На Рис. 4 приведена экспериментальная радиоголограмма тестового объекта в виде слова «RASCAN» и результат ее восстановления.




а) б)

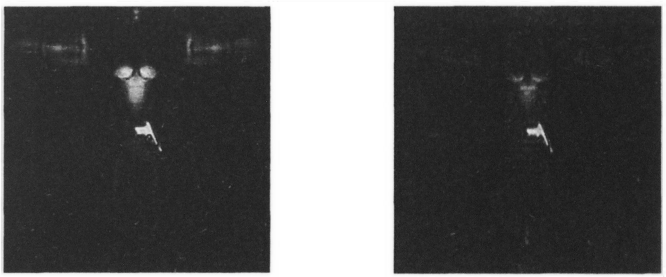
Рис. 4. Радиоголограмма (а) и результат ее восстановления (б)

Все разработанные алгоритмы моделирования и восстановления радиоголограмм сведены в единый программный комплекс.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию радиоголографических систем различного назначения.

Рассмотрен подповерхностный голографический радиолокатор РАСКАН, который использовался в экспериментах, и его программное обеспечение, разработанное в ходе выполнения диссертационного исследования. Исследовано влияние ширины полосы сигнала на качество получаемых радиоизображений.

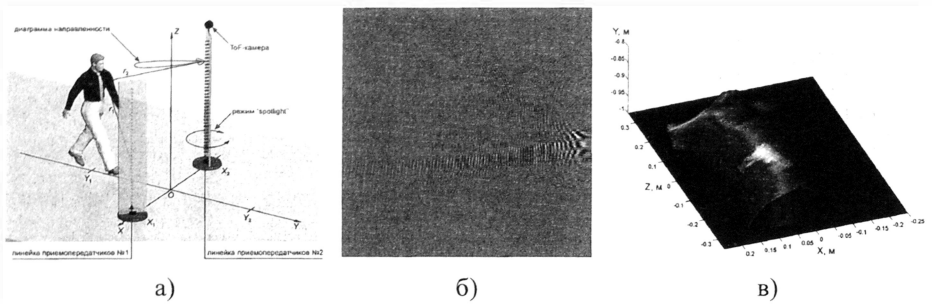
Теоретически обоснована возможность использования в радиолокаторах малой дальности разреженных антенных решеток, работающих по принципу MIMO, с уменьшенным количеством приемных и передающих элементов. Сравнивались результаты восстановления радиоголограмм, полученных, в первом случае, вертикальной антенной линейкой из 130 приемо-передающих элементов, расположенных с шагом 1 см, сканирующей в горизонтальном направлении с шагом 1 см, а во втором случае, вертикальной линейкой из 8 передающих элементов (шаг 2,48 см) и вертикальной линейкой из 16 приемных элементов (шаг 8,68 см), также сканирующих в горизонтальном направлении. На примере модели человека с размещенным на поясе пистолетом показано, что оба метода дают практически одинаковое высокое качество получаемых радиоизображений при многочастотном излучении в сантиметровом диапазоне волн 10…16 ГГц (Рис. 5), при этом в мультистатическом случае антенная система может иметь на порядок меньшее число передающих и приемных элементов.



а) б)

Рис. 5. Результаты восстановления
а — моностатический случай; б — мультистатический случай

Обоснована возможность использования комбинированной системы с инверсным синтезированием апертуры в радиолокационном канале и времяпролетной камерой в оптическом канале для досмотра свободно передвигающихся людей. Показано, что знание траектории поверхности тела человека позволяет восстанавливать радиоизображения объектов, двигающихся по произвольной траектории и изменяющих свою форму в процессе обследования. При этом радиоизображение формируется на поверхности тела человека (Рис. 6).




а) б) в)

Рис. 6. Досмотровая система с инверсным апертурным синтезом
а — возможная геометрия; б — радиоголограмма; в — результат восстановления

В **четвертой главе** представлены результаты сравнительного анализа вычислительных экспериментов и экспериментальных данных. Адекватность разработанной математической модели представления поверхности объектов плотным набором точечных рассеивателей была проверена путем сравнения с результатами экспериментов. Для этого радиоголограммы одних и тех же объектов (уединенный пистолет и пистолет на манекене) сначала были получены путем моделирования, а затем — экспериментально.

На рис. 7 и 8 представлены результаты сравнения для пистолета и манекена соответственно: а — фотография объекта; б — радиоголограмма, полученная с помощью модели; в — результат ее восстановления; г — радиоголограмма, полученная экспериментально; д — результат ее восстановления.

Представленные результаты свидетельствуют о хорошем соответствии результатов моделирования экспериментальным данным, что подтверждает возможность использования предложенной модели представления поверхности объекта плотным

набором точечных рассеивателей для экспертной оценки различных конфигураций радиолокационных систем малой дальности при их проектировании.

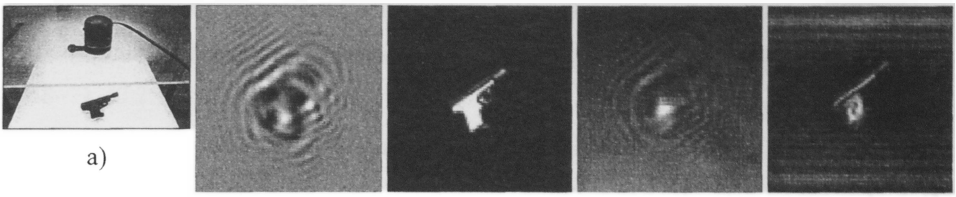



Рис. 7. Результаты сравнения для пистолета

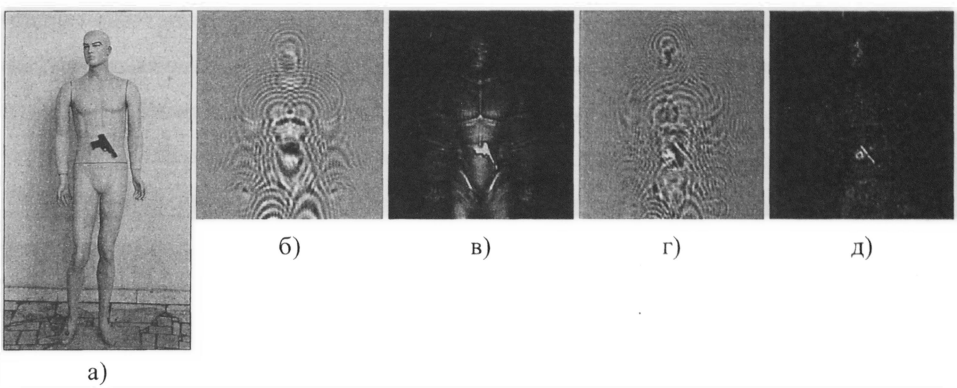



Рис. 8. Результаты сравнения для манекена

***Основные результаты диссертационной работы***

1. Разработана и обоснована математическая модель представления поверхности объектов сложной формы в виде набора плотно расположенных точечных рассеивателей. На ее основе разработаны алгоритмы и программный комплекс для моделирования процесса регистрации и восстановления радиоголограмм объектов любой сложности применительно к радиолокационным системам малой дальности при различных вариантах их построения. Адекватность предложенного метода подтверждена сравнением как с результатами, полученными с помощью аналитического решения, так и с экспериментальными данными.

2. Разработанная модель использована для исследования радиолокационных систем различной конфигурации. Показано, что сканирующая антенная система, со-

стоящая из двух линейных антенных решеток, работающих по схеме MIMO, может быть разреженной и иметь примерно на порядок меньшее число элементов, чем линейная антенная решетка с плотным расположением приемо-передающих элементов, и при этом обеспечивать такое же высокое качество получаемых радиоизображений.

3. Исследована радиолокационная система досмотра передвигающихся естественным образом людей, дополненная времяпролетной камерой, необходимой для знания координат поверхности объекта в каждый момент времени. Показано, что такая система позволяет путем инверсного синтезирования апертуры получать качественные многоракурсные радиоизображения объектов, двигающихся мимо стационарной антенной системы (состоящей из двух вертикальных антенных линеек) по произвольной траектории и меняющих свою форму в процессе движения.

4. Разработана пользовательская часть программного обеспечения для подповерхностных радиолокаторов серии РАСКАН, служащая как для управления радиолокаторами в процессе регистрации радиоголограмм, так и для восстановления получаемых радиоголограмм.

***Основные результаты диссертации отражены в работах:***

**1. Разработка технологии голографических подповерхностных радиолокаторов и ее применение / В. В. Разевиг [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 1–2. С. 5–18. (0.88 п.л./0.56 п.л.).**

**2. Восстановление микроволновых голограмм, полученных подповерхностным радиолокатором РАСКАН / В. В. Разевиг [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 51–58. (0.5 п.л./0.45 п.л.).**

**3. Влияние ширины полосы частот на качество восстановления подповерхностных радиоголограмм / В. В. Разевиг [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 3. С. 3–13. (0.69 п.л./0.52 п.л.).**

4. Разработка методов, основанных на регистрации и восстановлении голографических радиолокационных изображений СВЧ диапазона, для создания высокопроизводительных железнодорожных терминалов досмотра пассажиров / В. В. Разевиг [и др.] // Технические и программные средства систем управления,

контроля и измерения: Труды III Российской конференции с международным участием. М., 2012. С. 321–333. (0.2 п.л./0.15 п.л.).

5. Processing of Holographic Subsurface Radar Data / V. Razevig [et al.] // Proceeding of the XIV Int. Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai, China, 2012. P. 68–71. (0.25 п.л./0.15 п.л.).

6. Comparison of Different Methods for Reconstruction of Microwave Holograms Recorded by the Subsurface Radar Data / V. Razevig [et al.] // Proceeding of the XIV Int. Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai, China, 2012. P. 335–339. (0.31 п.л./0.25 п.л.).

**7. Разевиг В. В., Бугаев А. С., Чапурский В. В. Сравнительный анализ фокусировки классических и мультистатических радиоголограмм // Радиотехника. 2013. Вып. 8. С. 8–17. (0.63 п.л./0.55 п.л.).**

8. RASCAN holographic radar for detecting and characterizing dinosaur tracks / V. Razevig [et al.] // Proceedings of the VII Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Nantes, France, 2013. P. 71–76. (0.38 п.л./0.1 п.л.).

9. Holographic Microwave Imaging Radar for Applications In Civil Engineering / V. Razevig [et al.] // Proceedings of the IET Int. Radar Conference. Xian, China, 2013. P. 1–5. (0.31 п.л./0.15 п.л.).

**10. Диагностика теплозащитных покрытий изделий ракетно-космической техники с помощью голографического подповерхностного радиолокатора «РАСКАН-5» / В. В. Разевиг [и др.] // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 52–61. (0.63 п.л./0.35 п.л.).**

11. Микроволновая система досмотра человека в движении на основе комбинированного использования 3D-видеосенсора и радиолокационной системы / В. В. Разевиг [и др.] // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Сборник научных статей X Всероссийской научно-технической конференции. Пенза, 2014. С. 160–165. (0.38 п.л./0.14 п.л.).

**12. Разевиг В. В. Моделирование процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой и сверхмалой дальности // Наука и образование: Электрон. журнал. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 6.**

**С. 336–349. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/712294.html (дата обращения: 03.11.2014). (0.88 п.л./0.88 п.л.).**

13. Holographic subsurface radar for diagnostics of cryogenic fuel tank thermal insulation of space vehicles / V. Razevig [et al.] // NDT & E International. 2015. V. 69. P. 48–54. (0.44 п.л./0.25 п.л.).

14. Shallow depth subsurface imaging with microwave holography / V. Razevig [et al.] // Processing of SPIE Symposium on Defense and Security, Radar Sensor Technology XVIII Conference. Baltimore, Maryland, USA, 2014, V. 9072. P. 90720X-1...9. (0.56 п.л./0.24 п.л.).

15. Inverse synthetic aperture radar imaging for concealed object detection on a naturally walking person / V. Razevig [et al.] // Processing of SPIE Symposium on Defense and Security, Radar Sensor Technology XVIII Conference. Baltimore, Maryland, USA, 2014, V. 9074. P. 907402-1…11. (0.69 п.л./0.2 п.л.).

16. ISAR for concealed objects imaging / V. Razevig [et al.] // Processing of SPIE-IS&T Electronic Imaging, Computational Imaging XIII Conference. San Francisco, California, USA, 2015. V. 9401. P. 94010I-1…15. (0.94 п.л./0.63 п.л.).

17. Устройство зондирования конденсированных сред: Патент № 2460099. Рос. Федерация / В. В. Разевиг [и др.]. № 2011116677; заявл. 28.04.2011; зарегистр. в Госуд. реестре изобретений Рос. Федерации 27.08.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24. 5 с.

18. Способ получения радиоголограмм подповерхностных объектов: Патент № 2482518. Рос. Федерация / В. В. Разевиг [и др.]. № 2011144154; заявл. 01.11.2011; зарегистр. в Госуд. реестре изобретений Рос. Федерации 20.05.2013; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14. 6 с.

19. Способ дефектоскопии теплозащитных и теплоизоляционных покрытий изделий: Патент № 2532414. Рос. Федерация / В. В. Разевиг [и др.]. № 2013158493; заявл. 30.12.2013; зарегистр. в Госуд. реестре изобретений Рос. Федерации 05.09.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31. 8 с.

20. Способ досмотра скрытых предметов под одеждой и в переносимом багаже человека, передвигающегося естественно: Патент № 2564693. Рос. Федерация / В. В. Разевиг [и др.]. № 2014110651; заявл. 20.03.2014; зарегистр. в Госуд. реестре изобретений Рос. Федерации 09.09.2015; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28. 7 с.