

ИЛЬИН ЕВГЕНИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ
СРЕД, ЗОНДИРУЕМЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ - устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гринев Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Чебышев Вадим Васильевич

кандидат технических наук
Седлецкий Рудольф Миронович

Ведущая организация: ОАО «Концерн Радиостроения «Вега»

Защита диссертации состоится «14» декабря 2010 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н., доцент

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Диагностика подповерхностных плоскостных сред (дорожных покрытий) сводится к определению толщины слоев и их электрофизических параметров (абсолютные диэлектрические и магнитные проницаемости, проводимости) и последующей их связью с параметрами материалов и технологией дорожных покрытий.

Для диагностики дорожных покрытий используются радары подповерхностного зондирования (РПЗ), использующие сверхширокополосные (СШП) сигналы (короткоимпульсные, со ступенчатым изменением частоты и т.д.). К СШП относят сигналы, обладающие хотя бы одним из следующих свойств:

- разность между верхней f_v и нижней f_n частотами спектра $f_v - f_n$ (ширина спектра по уровню -10 дБ) не менее 500 МГц;
- отношение ширины спектра $f_v - f_n$ к его средней частоте $(f_v + f_n) / 2$ (относительная полоса частот) не менее 0.2.

Радары подповерхностного зондирования, разрабатываемые на основе традиционных программных и аппаратных технологий отечественными и зарубежными фирмами: GSSI и Penetradar (США), ERA Technology и Redifon (Англия), Sensor and Software (Канада), NTT (Япония), MALA (Швеция), Radar Company (Латвия), НТП Тензор (Россия), ООО «Логические системы» (Россия) и др., не в состоянии решать многие важные народнохозяйственные задачи.

В частности, при мониторинге дорожных покрытий (дорожной одежды), взлётно-посадочных полос и т.п. погрешность определения толщины слоёв достигает 15 – 20 %, а электрофизических параметров – 20 – 30 %, что не позволяет судить о качестве выполненных строительных работ и наличии аномалий; затруднена сама идентификация аномалий – пустоты или заполнение водой и т.п.

Проблеме диагностики подповерхностных сред посвящено достаточно много работ. Большинство из них опираются на эвристические подходы, использующие лучевую трактовку и френелевские формулы, в частности: метод средней точки, метод поверхностного отражения и алгоритм инверсии при последовательном демонтаже слоев. При этом только часть данных, регистрируемых РПЗ, используются при обработке, а лучевые модели распространения электромагнитной волны, применяемые в них, не учитывают истинную структуру зондирующего поля и непригодны для многослойных и «тонких» слоев структуры.

Чтобы полнее использовать информационную емкость регистрируемых РПЗ данных, необходимо осуществить полное электродинамическое моделирование процессов

зондирования и рассеивания средой электромагнитного поля с учетом характеристик приемопередающей антенны и тракта РПЗ, а на последнем этапе реализовать инверсию регистрируемых данных. Поэтому в настоящее время развиваются электродинамические методы, учитывающие особенности зондирования, отражения и приема СШП сигнала для восстановления электрофизических и геометрических параметров многослойных сред.

Актуальность работы обусловлена необходимостью существенно повысить достоверность диагностики параметров подповерхностной области на модели плоскостройной среды применительно к диагностике дорожных покрытий, увеличить в несколько раз оперативность мониторинга (за счет многоканальности), исключить трудоёмкие инвазивные процедуры контрольного бурения, сократить расходы на эксплуатацию, создать устойчивую ежегодно обновляемую базу данных параметров дорожных покрытий.

Описываемые в диссертации алгоритмы реализованы для использования с многоканальными РПЗ. Многоканальные РПЗ позволяют, как приобрести новые функциональные возможности, так и улучшить характеристики, а именно:

- существенно сократить время мониторинга за счет многоканального режима работы;
- формировать в реальном масштабе времени 3D радиоизображение подповерхностной области с более высоким качеством по сравнению со стратегией комплексирования В-изображений;
- увеличить вероятность обнаружения и идентификации линейно протяжённых объектов (труб, кабелей) в силу формирования специфической радарограммы.

Целью работы является развитие методов, алгоритмов обработки и программного обеспечения реконструкции электрофизических и геометрических параметров подповерхностных плоскостройных сред, зондируемых сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами, для повышения достоверности диагностики подповерхностных плоскостройных сред (дорожных покрытий и родственных объектов).

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Развита методы определения геометрических и электрофизических параметров подповерхностной области на модели плоскостройной среды (дорожных покрытий) на основе закономерностей, связывающих их параметры с формой рассеянного ими зондирующего сверхширокополосного короткоимпульсного сигнала.

2. Разработаны алгоритмы учёта импульсных характеристик приёмо-передающих СШП антенн для электродинамических моделей разного уровня и процедур специальной

калибровки подповерхностного радара для компенсации нестабильности сигнала генератора и устранения переотражений в тракте.

3. Разработаны алгоритмы диагностики подповерхностных плоскостойких сред (дорожных покрытий) с учетом характеристики приёмо-передающей СШП антенны на основе двух подходов: метода вычислительной диагностики – разложения по плоским волнам и метода вычислительной диагностики – виртуального источника.

4. Разработан для многоцелевых многоканальных радаров подповерхностного зондирования единый комплекс прикладных программ, реализующий сбор информации и управление радаром, формирование радиоизображений и диагностику среды.

5. Проведены экспериментальные исследования восстановления геометрических и электрофизических параметров подповерхностных плоскостойких сред (дорожных покрытий) с помощью многоканального сверхширокополосного РПЗ для подтверждения заложенных принципов и технологий.

Методы исследований

Для решения поставленных задач используются:

- метод интегральных уравнений для постановки задачи восстановления электрофизических и геометрических параметров;
- метод конечных разностей во временной области (КРВО) и представления функции Грина в виде суперпозиции элементарных плоских Е- и Н-волн для решения прямой задачи;
- метод вычислительной диагностики для решения обратной задачи восстановления геометрических и электрофизических параметров плоскостойких сред при зондировании сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами;
- методы глобальной оптимизации (генетический алгоритм, алгоритм роя пчел) для поиска глобального минимума оптимизируемой невыпуклой и многопараметрической целевой функции (оптимизационного функционала);
- процедуры калибровки для компенсации нестабильности сигнала генератора, устранения переотражений в тракте, определения виртуального центра.

Научная новизна

На основе выявленных закономерностей, связывающих электрофизические и геометрические параметры плоскостойких сред с формой (спектральной плотностью) рассеянного ими зондирующего СШП короткоимпульсного сигнала, развиты методы и программные технологии диагностики дорожных покрытий. По сравнению с известными

подходами развитые методы, алгоритмы обработки и процедуры калибровки на основе единого программного комплекса позволяют:

- уменьшить погрешности определения геометрических и электрофизических параметров подповерхностных плоскостных сред (дорожных покрытий) до ~10 %, что позволит судить о качестве выполненных строительных работ, связав указанные параметры с качеством материалов и технологиями выполнения дорожных покрытий;

- существенно сократить время мониторинга за счет многоканального режима работы, исключить трудоёмкие инвазивные процедуры контрольного бурения, сократить расходы на эксплуатацию.

Практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- комплекс прикладных программ предназначен для многоканальных многофункциональных РПЗ и позволяет осуществлять управление РПЗ, регистрацию и первичную обработку принятых сигналов, вторичную обработку, формирование радиоизображений подповерхностных объектов, диагностику параметров среды и объектов инфраструктуры;

- разработанные алгоритмы на основе метода вычислительной диагностики – разложения по плоским волнам и метода вычислительной диагностики – виртуального источника могут быть использованы в радарх иного типа для повышения достоверности диагностики электрофизических и геометрических параметров подповерхностных плоскостных сред (дорожных покрытий).

Реализация и внедрение результатов работы

Комплекс прикладных программ, предназначенный для многоканальных многофункциональных РПЗ, позволяет осуществлять управление РПЗ, регистрацию и первичную обработку принятых сигналов, вторичную обработку, формирование радиоизображений подповерхностных объектов, диагностику параметров среды (реализуемая на основе алгоритмов, разработанных в диссертации) и объектов инфраструктуры, внедрены в РПЗ, разработанные с личным участием автора, в НИР «Водолей» (госконтракт № 05/243, 2005 – 2007 гг. с в/ч 43753) и ОКР «Водолей–Э1» (госконтракт № 08/49, 2008 – 2010 гг. с в/ч 43753)

Достоверность полученных результатов обусловлена корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного электродинамического аппарата при нахождении рассеянных электромагнитных полей методом конечных разностей

во временной области, тестированием алгоритмов восстановления на моделях плоскостойких сред с помощью моделирования методом конечных разностей во временной области, близостью результатов численного имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- XIII International Conference on Ground Penetrating Radar Lecce, Italy, June 21-25, 2010;
- 17-й и 20-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Украина, 2007, 2010 гг;
- Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, 2009;
- 3-й Международной конференции Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации, Суздаль, 2009;
- 14-й Международной Научно-технической Конференции "Радиолокация, навигация, связь (RLNC - 2008)". Воронеж, 2008;
- 2-й всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006 г.;
- Научно-технической конференции «Центральный научно-исследовательский институт радиоэлектронных систем – 2006»:.. Москва, 2006 г.;
- Научно-технической конференциях МАИ. Москва, 2005, 2006, 2008 гг.

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 17 печатных работ, из них 5 научных статей (из них 4 в журналах, рекомендуемых ВАК) и 12 тезисов докладов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные алгоритмы электродинамического моделирования для диагностики подповерхностных сред на основе двух подходов: метода вычислительной диагностики – разложения по плоским волнам и метода вычислительной диагностики – виртуального источника позволяют решить многопараметрическую обратную задачу восстановления геометрических и электрофизических параметров плоскостойких сред при зондировании

сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами с учётом характеристик приёмопередающей антенны.

2. Разработанное программное обеспечение на основе развитых методов и соответствующих процедур калибровки уменьшает погрешность определения геометрических и электрофизических параметров плоскостойких сред до значений ~10%, что позволит судить о качестве выполнения дорожных покрытий при их мониторинге, исключить трудоёмкие инвазивные процедуры контрольного бурения, сократить расходы на эксплуатацию, создать устойчивую ежегодно обновляемую базу данных эксплуатируемых объектов подземной инфраструктуры.

3. При экспериментальных исследованиях с помощью многоцелевого многоканального сверхширокополосного радара подповерхностного зондирования, использующего разработанное программное обеспечение, при существенном сокращении времени мониторинга в 2 – 3 раза достигнута погрешность ~10% определения геометрических и электрофизических параметров тестируемых сред, что подтверждает заложенные принципы и технологии.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 198 машинописной странице и состоит из введения, пяти разделов, заключения, 1 приложения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 90 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел диссертации содержит аналитический обзор по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике, связанной с диагностикой геометрических и электрофизических параметров плоскостойких сред. Рассматриваются эвристические подходы к диагностике подповерхностной области, в частности, метод средней точки и метод поверхностного отражения. Эти методы используют только часть данных, регистрируемых РПЗ, не учитывают истинную структуру зондирующего поля и непригодны для многослойных и «тонких» слоев структуры.

Приводятся краткие сведения об алгоритмах диагностики, основанных на электродинамическом моделировании, в частности, алгоритм электромагнитной инверсии, алгоритм на основе метода вычислительной диагностики (МВД) – разложения по плоским волнам, алгоритм на основе МВД – виртуального источника и алгоритм на основе МВД –

дипольной аппроксимации. Алгоритмы на основе МВД – разложения по плоским волнам и МВД – виртуального источника рассматриваются в последующих разделах диссертации.

Во **втором разделе** диссертации рассматриваются основные теоретические соотношения реконструкции электрофизических и геометрических параметров подповерхностных плоскостойких сред (дорожных покрытий и родственных объектов), зондируемых сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами. Определяются основные этапы стратегии реконструкции электрофизических и геометрических параметров диэлектрических объектов (плоскостойкая модель среды) по измеренным дискретным пространственно-частотным выборкам рассеянного электромагнитного поля.

Используемые алгоритмы диагностики основаны на МВД, который позволяет решать обратную задачу. При использовании МВД постановка задачи сводится к определению электрофизических и геометрических параметров дискретной плоскостойкой среды \mathbf{x} ($\varepsilon_i, \mu_i, \sigma_i, d_i; i \in [1, n]$) по известным (измеренным) характеристикам рассеяния сверхширокополосного электромагнитного поля \mathbf{u} , которые связаны операторным уравнением первого рода:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{u}, \quad \mathbf{x} \in X, \quad \mathbf{u} \in U, \quad (1)$$

где X и U – метрические пространства, \mathbf{A} – нелинейный (относительно восстанавливаемых параметров среды) материальный оператор.

В соответствии с МВД, задача в общем случае сводится к безусловному экстремуму функционала невязки

$$\Phi_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{A}, \mathbf{u}_\Delta) = \|\mathbf{Ax} - \mathbf{u}_\Delta\|_U^2 + \alpha \left[\Omega(\mathbf{x}) + \gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_X^2 \right], \quad (2)$$

при этом решение находится из условия его минимизации

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\alpha\Delta} = \{ \mathbf{x}_{\alpha\Delta} : \inf [\Phi_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{A}, \mathbf{u}_\Delta)] \} \quad (3)$$

Первое слагаемое в правой части (2) представляет функционал невязки между результатами измерений рассеянного поля \mathbf{u}_Δ и модельной прямой задачей. Положительно определённый функционал $\Omega(\mathbf{x})$ (α – параметр регуляризации) реализует отбор из множества решений $X_\Delta - \|\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_{\alpha\Delta} - \mathbf{u}_\Delta\|_U^2 \leq \Delta^2$ наиболее простого решения $\tilde{\mathbf{x}}_{\alpha\Delta}$ в соответствии с априорными требованиями. Функционал $\Omega(\mathbf{x})$ должен задавать дополнительное условие, определяющее компактное множество моделей среды $\tilde{\mathbf{x}}_{\alpha\Delta} \in X_C$. В случае плоскостойкой среды это априорное задание числа слоёв и диапазон изменения параметров в слоях. Дополнительный стабилизатор $\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_X^2$ (γ -вес, определяющий степень априорной информации о каждом из параметров) осуществляет при необходимости

выбор из множества X_{Δ} решения, наиболее близкого к построенному на основе априорной информации гипотетическому решению \mathbf{x}_0 .

Поскольку процедура определения \mathbf{x} , в соответствии с (2), существенно основана на решении прямой задачи, то для использования МВД необходимо иметь в наличии эффективные алгоритмы решения прямой задачи. Наиболее простое решение – это зондирование плоскострой среды из n слоев плоской электромагнитной волной. Тогда решение находится в соответствии с (2) из условия минимизации следующего функционала по результатам измерения на N_F частотах:

$$\Phi_{\alpha}(\mathbf{x}, \mathbf{A}, \mathbf{u}_{\Delta}) = \sum_{n=1}^{N_F} |(\dot{R}_H(\omega_i, \mathbf{x}) - \dot{R}_M(\omega_i, \mathbf{x}))|^2 / N_F + \alpha \sum_{i=1}^n \gamma_i \|(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i0})\|^2, \quad \mathbf{x}_{i0} \in [\mathbf{x}_{i\min}, \mathbf{x}_{i\max}] \quad \text{при} \quad z_{i-1}(x, y) < z < z_i(x, y), \quad i = [1, n] \quad (4)$$

где $\dot{R}_H(\omega, \mathbf{x})$, $\dot{R}_M(\omega, \mathbf{x})$ – измеренный (экспериментальный) и модельный комплексные коэффициенты отражения (нормированные передаточные характеристики) среды соответственно. $\dot{R}_M(\omega, \mathbf{x})$ должен соответствовать выбранной модели среды, а также условиям приёма и зондирования среды реальным электромагнитным полем антенны. При использовании функционала (2) необходимо исключить все артефакты, искажающие СШП зондирующий сигнал, из которых наиболее существенным для данной задачи являются искажения, вносимые импульсной характеристикой сверхширокополосной передающей и приёмной антеннами. Для минимизации функционала, полученного с помощью МВД используются методы глобальной оптимизации, в частности, генетический алгоритм (ГА) и алгоритм роя пчел.

Основываясь на общей стратегии, рассмотрены два алгоритма диагностики. Первый используемый алгоритм восстановления параметров плоскострой сред основан на МВД и разложении по плоским волнам. Этот алгоритм позволяет не только рассчитать рассеянное подповерхностной областью поле, но и учесть импульсную характеристику антенны. При этом используется следующий подход: рассчитывается (или измеряется) векторное электрическое поле на плоскости в ближней зоне передающей антенны; реализуется известное разложение этого поля по плоским Е- и Н-волнам; определяется число плоских волн N_{PW} , которые следует учитывать при оценке $\dot{R}_M(\omega_i, \mathbf{x})$, исходя из задаваемой погрешности и трансформации рассеянного поля на выход приёмной антенны; строится и минимизируется функционал невязки (2) с учетом N_{PW} плоских волн.

В соответствии с этим, сигнал на выходе приемной антенны в частотной области представим в виде:

$$\tilde{U}_{N_{PW}}(\omega) = \sum_{p=-N_p/2}^{N_p/2} \sum_{q=-N_q/2}^{N_q/2} \tilde{\mathbf{h}}_{Rx}(\vec{r}'_0, \omega) \mathbf{E}_{ref}^{pq}(-\vec{k}'_{pq}, r'_q, \omega), \quad (5)$$

где $\tilde{\mathbf{h}}_{Rx}(\vec{r}'_0, \omega)$ – передаточная характеристика приемной антенны в направлении \vec{r}'_0 – направление прихода плоской волны $\mathbf{E}(0, 0, z_a)$ в приемную антенну, в точку $(x = 0, y = 0, z = z_a)$, определяющую координаты некоторого виртуального источника внутри антенны, от которого поле убывает как $1/r'$; $\mathbf{E}_{ref}^{pq}(-\vec{k}'_{pq}, r'_q, \omega)$ – отраженная от слоистой среды плоская волна, приходящая с направления \vec{k}'_{pq} , определяемого углами θ_q, φ_p ; $r'_q = 2(z_{zp} + |z_a|)/|\cos \theta_q|$.

Тогда с учетом (5) модельный коэффициент отражения, используемый в функционале (4), на выбранных частотах представим в виде

$$\dot{R}_M(\omega_i, \mathbf{x}) = \sum_{p=-N_p/2}^{N_p/2} \sum_{q=-N_q/2}^{N_q/2} [\beta_{pq}^H R^H(\theta_q, \omega_i) + \beta_{pq}^E R^E(\theta_q, \omega_i)], \quad (6)$$

где $R^H(\theta_q, \omega_i)$ и $R^E(\theta_q, \omega_i)$ – коэффициенты отражения Френеля для Н- и Е-волн соответственно, а β_{pq}^H и β_{pq}^E – комплексные амплитуды плоских волн, приходящих с направления θ_q, φ_p .

Для определения необходимого числа плоских волн N_{PW} проведено численное моделирование методом КРВО. В качестве антенны при моделировании использовался Трупор. Количество распространяющихся и затухающих плоских Е- и Н-волн определялось на основе сравнения с полем антенны РПЗ на расстояниях, соответствующих расстояниям до среды или объекта. Приведены результаты сравнения поля излучения модели рупорной антенны в приближении плоских Е- и Н-волн, и поля излучения на основе моделирования методом КРВО, в виде:

$$\Delta(x, y, z = z_2, \omega) = \left| E_{\text{radv}}^{(H+E)} - E_{\text{radv}}^{KPBO} \right| / \left| E_{\text{max}}^{KPBO} \right|, \quad (7)$$

где E_{radv}^{KPBO} – модельное поле в плоскости z_2 (рисунок 1), $E_{\text{radv}}^{(H+E)}$ – поле, рассчитанное с помощью конечного числа плоских волн, E_{max}^{KPBO} – максимальное значение модельного поля на плоскости z_2 .

На рисунке 1 представлена геометрия и размеры электродинамического объекта для численного моделирования поля излучения рупорной антенны, ориентированной вдоль оси z , размеры которой $a = 0,17$ м $b = 0,16$ м, угол $\alpha = 23^\circ$. Размеры области моделирования составили соответственно $\Delta X_M = \Delta Y_M = 6,45$ м, $Z = 0,7$ м, а расстояние от точки

возбуждения антенны до плоскости регистрации поля $z_1 = 0,27$ м, а до плоскости $z_2 = 0,57$ м. соответственно. Расстояния между регистраторами эквивалентного тока в плоскости z_1 составили $\Delta x = 5,0$ см, $\Delta y = 5,0$ см, что удовлетворяет условию $\Delta x, \Delta y \leq \lambda_{\min}/2$. Для уменьшения «звона» на внешней стороне проводящих треугольных элементов-пластин антенны расположена резистивная нагрузка, моделируемая в виде пластин толщиной $d_r = 0,02$ м, проводимостью $\sigma_r = 0,25$ См/м, $\varepsilon = 1,2$ (см. рисунок 1).

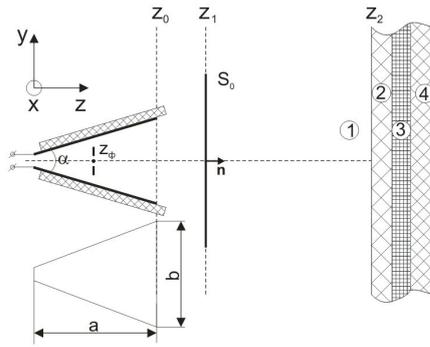


Рисунок 1 – Геометрия моделируемой задачи.

Погрешность при аппроксимации поля конечным числом плоских волн в плоскости z_2 на частоте $f = 1.0$ ГГц при $N_x \times N_y = 41 \times 41$ не превышает 8 %, при $N_x \times N_y = 15 \times 15$ погрешность по полю не превышает 15 %, при $N_x \times N_y = 11 \times 11$ погрешность не превышает 25 %. На рисунке 2 представлены передаточные характеристики (сигнатуры) плоскостойкой среды $K_{cp}(f)$, рассчитанных аналитически на основе (6), с использованием ограниченного количества плоских волн (100 плоских волн), и полученных по результатам численного моделирования методом КРВО.

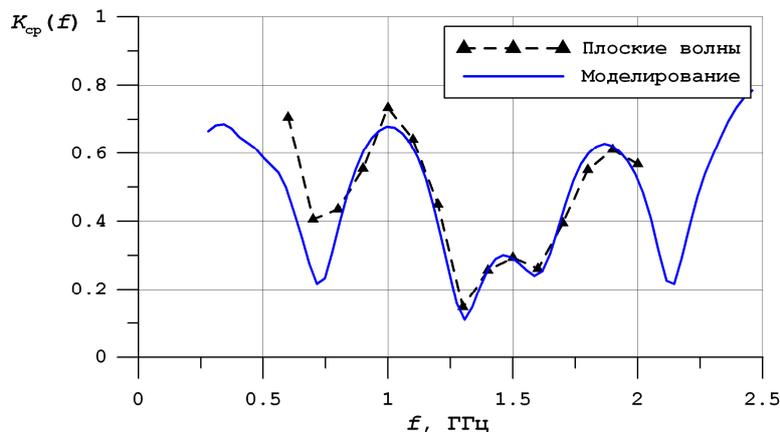


Рисунок 2 – Передаточная характеристика плоскостойкой среды.

Параметры моделируемой среды представлены в таблице 1.

Таблица 1

Номер слоя	Диэлектрическая проницаемость	Толщина, м	Проводимость, См/м
1 (воздух)	1.0	0.5*	0.0
2	4.0	0.105	0.0
3	1.0	0.10	0.0
4	4.0	∞	0.0

* Расстояние от апертуры антенны до второго слоя

Полученное совпадение результатов позволяет использовать представленную передаточную характеристику плоскостройной среды для построения функционала сравнения (2).

Второй используемый в работе алгоритм диагностики основывается на МВД и методе виртуального источника. При таком подходе к диагностике среды, влияние приемопередающей антенны РПЗ осуществляется на основе представления реальной антенны некой «эквивалентной» антенной. При этом характеристики антенны и поле излучения, отраженное слоистой средой, отождествляется с полем, создаваемым элементарным электрическим диполем (ЭЭД), расположенным над поверхностью среды в точке, определяемой координатами некоторого виртуального источника, расположенного внутри реальной антенны (рисунок 3). Характеристики направленности реальной антенны при этом не учитываются, рассматривается лишь ее частотная характеристика, которая, как и координаты виртуального источника, определяется процедурами калибровки.

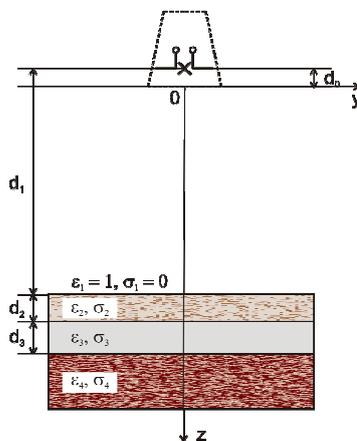


Рисунок 3 – Геометрия задачи.

В данном подходе, в отличие от метода МВД – разложения по плоским волнам, учет характеристик антенны и радиочастотного тракта проведен на основе электродинамического моделирования, включающего представление электромагнитного поля передающей антенны «эквивалентным» электрическим (или магнитным) диполем. Далее поле, излучаемое диполем, представлено в виде суммы затухающих и распространяющихся плоских Е- и Н-волн.

Получено представление отраженного поля в плоскости, расположенной на расстоянии d_1 от границы плоскослоистой среды до электрического диполя в виртуальной точке с координатами $x' = y' = 0$, $z' = -d_0$ (рисунок 3), в виде непрерывного пространственно-частотного (ПЧ) спектра отраженных от среды плоских Е- и Н-волн:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{\text{ref}\vartheta}(k_x, k_y, z, z', \omega) = \left\{ \tilde{\mathbf{G}}_{\text{ref}\vartheta}^E \tilde{\mathbf{J}}_{\vartheta} R_1^E + \tilde{\mathbf{G}}_{\text{ref}\vartheta}^H \tilde{\mathbf{J}}_{\vartheta} R_1^H \right\} \exp[-ik_{1z}(2d_1)]. \quad (8)$$

Здесь $\tilde{\mathbf{G}}_{\vartheta}^E$ и $\tilde{\mathbf{G}}_{\text{ref}\vartheta}^E$ – компоненты тензора функции Грина для Е- и Н-волн, $\tilde{\mathbf{J}}_{\vartheta} = \{\mp 0,5p_y^{\vartheta}; \pm 0,5p_x^{\vartheta}; 0\}^T$ – вектор строка электрических моментов диполя, T – знак транспонирования; $R_{\kappa}^{E(H)}$ и $r_{\kappa}^{E(H)}$ – глобальные и локальные коэффициенты отражения Френеля соответственно:

$$R_{\kappa}^{E(H)} = \frac{r_{\kappa}^{E(H)} + R_{\kappa+1}^{E(H)} \exp(-i2k_{\kappa+1,z}d_{\kappa+1})}{1 + r_{\kappa}^{E(H)} R_{\kappa+1}^{E(H)} \exp(-i2k_{\kappa+1,z}d_{\kappa+1})}, \quad (9)$$

$$r_{\kappa}^H = \frac{\mu_{a(\kappa+1)}k_{z\kappa} - \mu_{ak}k_{\kappa+1,z}}{\mu_{a(\kappa+1)}k_{z\kappa} + \mu_{ak}k_{\kappa+1,z}}, \quad r_{\kappa}^E = \frac{\varepsilon_{a(\kappa+1)}k_{z\kappa} - \varepsilon_{ak}k_{\kappa+1,z}}{\varepsilon_{a(\kappa+1)}k_{z\kappa} + \varepsilon_{ak}k_{\kappa+1,z}},$$

при этом $R_{K-1}^{E(H)} = r_{K-1}^{E(H)}$, $\varepsilon_{ak} = \varepsilon_{\kappa}\varepsilon_0 - i\sigma_{\kappa}/\omega$, $k_{z\kappa} = \sqrt{k_{\kappa}^2 - k_{\rho}^2}$, $k_{\kappa} = \sqrt{\omega^2\varepsilon_{ak}\mu_{ak} - i\omega\mu_{ak}\sigma_{\kappa}}$, а ε_{ak} , μ_{ak} , σ_{κ} , d_{κ} , k_{κ} – диэлектрическая, магнитная проницаемости, проводимость, толщина и волновое число k -ого слоя среды, при этом $k = 1, 2, \dots, K$, где K – количество слоев.

Для аппроксимации непрерывного пространственно-частотного спектра (8), излучаемого диполем, используется интегральное представление скалярной функции Грина ограниченным числом плоских волн:

$$g(\rho, \omega) = g_p(\rho, \omega) + g_e(\rho, \omega), \quad (10)$$

при этом непрерывные частотные спектры плоских волн на основе аппроксимации путем численного интегрирования с использованием квадратур Гаусса-Лежандра, могут быть представлены суммой конечного числа распространяющихся и затухающих плоских волн:

$$g_p^{PW}(\rho, \omega) \approx \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{q=1}^{N_q} W_{lq}^p e_{lq}^p, \quad g_e^{PW}(\rho, \omega) \approx \sum_{l=1}^{M_l} \sum_{q=1}^{M_q} W_{lq}^e e_{lq}^e, \quad (11)$$

где W_{lq}^p и W_{lq}^e – амплитуды распространяющихся e_{lq}^p и затухающих e_{lq}^e плоских волн соответственно; $\rho = \mathbf{x}_0x + \mathbf{y}_0y + \mathbf{z}_0z$ – текущий радиус-вектор, $\rho = |\rho|$ – расстояние от источника до точки наблюдения; θ_l, φ_q и α_l, φ_q – направления распространения плоских распространяющихся и затухающих волн и их количество N_l, N_q , M_l, M_q соответственно, последние определяют точность аппроксимации функции Грина на основе сравнения с (10).

Используя выражение для продольных компонент излученных Е- и Н-полей:

$$E_{\text{rad}Zv}^{E\varepsilon}(\rho, \omega) = \frac{-ip_v^3}{4\pi\omega\varepsilon_a} \frac{\partial^2}{\partial v \partial z} g(\rho, \omega), \quad H_{\text{rad}Zv}^{H\varepsilon}(\rho, \omega) = \mp \frac{p_v^3}{4\pi} \frac{\partial}{\partial v} g(\rho, \omega), \quad (12)$$

(индекс v обозначает x - или y -компоненту) аппроксимации скалярной функции Грина (11), получим отраженное поле (8) в виде суперпозиции плоских Е- и Н-волн.

$$E_{\text{rad}v}^{E(H)\varepsilon}(\rho, \omega) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{q=1}^{N_q} C_{vlq}^{E(H)p} e_{lq}^p + \sum_{l=1}^{M_l} \sum_{q=1}^{M_q} C_{vlq}^{E(H)e} e_{lq}^e, \quad (13)$$

где $C_{vlq}^{E(H)p}$ и $C_{vlq}^{E(H)e}$ – амплитуды отражённых от слоистой среды плоских Е- и Н-волн с учетом коэффициента отражения Френеля (9).

Для алгоритма на основе МВД – виртуального источника проводились расчеты, аналогичные представленным для алгоритма на основе МВД – плоских волн. Вначале было оценено необходимое количество плоских волн для аппроксимации поля диполя на основе (11), затем на основе (13) была построена передаточная функция (сигнатура) среды.

На основе полученных результатов было проведено численное моделирование восстановления параметров четырехслойной среды методом КРВО. Исходные параметры моделируемой среды представлены в таблице 2.

Таблица 2

Номер слоя	Диэлектрическая проницаемость	Толщина, м	Проводимость, См/м
1 (воздух)	1.0	0.5*	0.0
2	4.0	0.105	0.0
3	2.0	0.10	0.0
4	4.0	∞	0.0

* Расстояние от апертуры антенны до второго слоя

Перед этапом диагностики был произведен этап калибровки, заключающийся в вычитании фоновых отражений из сигналов, отраженных от плоскостлой среды и от металлического листа и в выделении полезного сигнала временным окном.

Минимизация функционала производилась с использованием алгоритма роя пчел со следующими параметрами:

Таблица 3

Параметр	Значение
Интервал изменения диэлектрических проницаемостей всех слоев.	от 1.0 до 10.0
Интервал изменения толщин всех слоев.	от 0.0 м до 0.3 м.
Количество пчел-разведчиков, N_{spy} .	50 пчел
Количество пчел, отправляемых на перспективные участки, $N_{selbees}$.	5 пчел
Количество пчел, отправляемых на лучшие участки, $N_{bestbees}$.	20 пчел
Количество выбираемых перспективных участков, N_{sel} .	20 участков
Количество выбираемых лучших участков, N_{best} .	10 участков

Коэффициент сжатия размеров выбранных и лучших областей по каждому параметру, k .	0.99
Диапазон частот восстановления.	0.4 ГГц – 1.8 ГГц
Количество частот.	22 частоты

Полученные результаты восстановления приведены в таблице 4.

Таблица 4

Номер слоя	Моделируемая диэлектрическая проницаемость	Восстановленная диэлектрическая проницаемость	Моделируемая толщина, м	Восстановленная толщина, м
1 (воздух)	1.0	-**	0.55*	-**
2	4.0	3.737	0.105	0.1087
3	2.0	1.718	0.10	0.1072
4	4.0	3.446	∞	-**

* Расстояние от точки «виртуального центра» антенны до второго слоя

** Параметр был задан и не восстанавливался.

На рисунке 4 показано сравнение передаточных характеристик, полученных с помощью моделирования методом КРВО, аналитически рассчитанной сигнатуры для моделируемой среды и аналитически рассчитанной сигнатуры для восстановленных параметров среды.

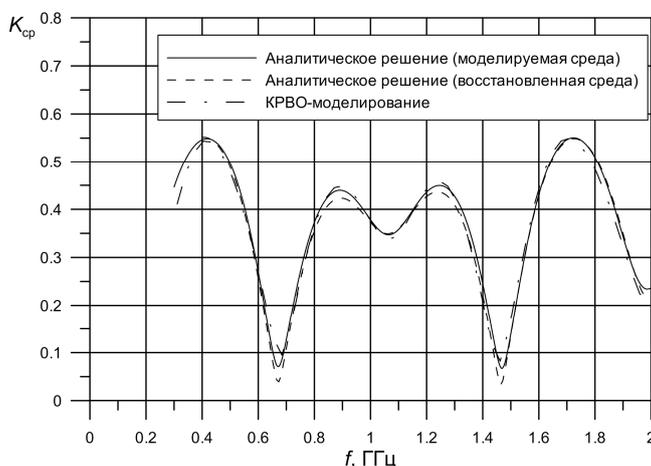


Рисунок 4 – Передаточные характеристики сред.

В третьем разделе диссертации рассмотрены алгоритмы глобальной оптимизации: генетический алгоритм и алгоритм роя пчел. Было указано на существенную проблему, возникающую при решении обратной задачи градиентными методами, которая связана со сложностью поиска глобального минимума оптимизируемой целевой функции (оптимизационного функционала), которая является невыпуклой и многопараметрической. Для таких задач применяют алгоритмы глобальной оптимизации.

ГА представляет собой моделирование естественной эволюции биологических организмов, открытой Ч. Дарвином, главный принцип которой заключается в том, что в процессе эволюции выживают особи, наиболее приспособленные к окружающей среде. То, насколько особь приспособлена, зависит от набора хромосом данной особи. Хромосомы особи, в свою очередь, зависят от хромосом родителей, которые передали части своих хромосом потомку при скрещивании, а также от случайных факторов (мутации). От набора хромосом зависит возможность особи произвести потомство, которое смогло бы выжить на протяжении следующих поколений. Плохо приспособленные особи либо вообще не смогут произвести потомство, либо их потомство не сможет конкурировать за выживание с другими особями.

Идея алгоритма пчел возникла из наблюдения за поведением пчел при поиске участков, где можно найти как можно больше нектара. Пчелы могут летать на довольно большие расстояния от улья в различных направлениях, что напоминает поиск экстремума на всей области поиска. Среди популяции пчел всегда есть небольшой процент так называемых пчел-разведчиков, которые начинают поиск нектара. Они разлетаются в случайном направлении и перелетают с места на место пока не найдут участок, где можно найти нектар. После того как пчелы-разведчики возвращаются в улей, в случае, если они нашли хороший участок для сбора нектара, они сообщают особым образом остальным пчелам направление на найденный участок, расстояние до него и качество найденного участка. После этого на найденные участки отправляются другие пчелы, причем, чем больше на данном участке предполагается найти нектара, тем больше пчел летит в этом направлении. Если пчела-разведчик нашла участок, где есть нектар, но его мало (меньше определенного порога), то пчелы туда не летят. Пчелы-разведчики, в свою очередь, опять улетают искать другие участки, после чего процесс повторяется.

Для проверки возможностей восстановления параметров плоскостлой среды были произведены численные эксперименты на основе генетического алгоритма. Предполагается идеализированная обстановка: в качестве модели падающего поля используется одна плоская волна, падающая по нормали к поверхности (искажающие свойства реальной антенны и высокочастотного тракта РПЗ не учитываются), среды взяты без потерь, количество слоев среды и диапазон изменения параметров задаются. Прямая задача рассчитывается аналитически с помощью коэффициентов отражения Френеля.

Исходные данные: трехслойная плоскостлой среда с параметрами:

- 1-й слой (воздух). $\epsilon_1 = 1$, $\sigma_1 = 0$ См/м.
- 2-й слой. $\epsilon_2 = 6$, толщина слоя $d_2 = 0.1$ м, $\sigma_2 = 0$ См/м.
- 3-й слой. $\epsilon_3 = 4$, $\sigma_3 = 0$ См/м.

В соответствии с генетическим алгоритмом используются следующие параметры:

- размер популяции 500 особей;
- вероятность скрещивания 90%;
- вероятность мутации 20%;
- диэлектрические проницаемости лежат в интервале 1 – 30;
- толщина второго слоя лежит в интервале 0 – 1.0 м;

Для проверки устойчивости алгоритма к отраженному сигналу добавлялся гауссов шум таким образом, что соотношение сигнал-шум задавалось заранее и рассчитывалось по формуле:

$$SNR_{дБ} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^M S_i^2}{\sum_{i=1}^M N_i^2} \right), \quad (14)$$

где S – сигнал без шума, N – гауссов шум с нулевым средним значением и с ограниченной полосой частот 0.1 ГГц – 3 ГГц, M – количество временных отсчетов в дискретном сигнале (в данном случае $M = 1024$).

Графики зависимости относительных погрешностей расчета параметров плоскостойкой среды в зависимости от соотношения сигнал-шум показаны на рисунке 5.

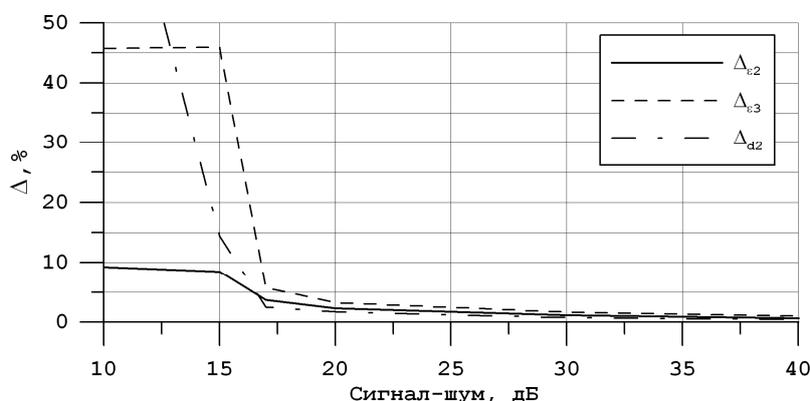


Рисунок 5 – Зависимости ошибки восстановления параметров плоскостойкой среды от соотношения сигнал-шум

Из рисунка 5 видно, что при соотношении сигнал-шум 17 дБ погрешность восстановления всех трех параметров не превышает 10%, а при соотношении сигнал-шум 20 дБ не превышает 5%. При увеличении соотношения сигнал-шум погрешность уменьшается.

Относительная погрешность рассчитывалась по формулам (15) – (17):

$$\Delta_a = \frac{\sigma_a}{a_{ист}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}, \quad (16)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (17)$$

где a – геометрический или электрофизический параметр, для которой вычисляется погрешность (в данном случае – диэлектрические проницаемости, толщина), $a_{ист}$ – истинное значение рассчитываемой величины, N – количество повторных расчетов, a_i – рассчитанное значение параметра при i -ом расчете, σ_a – квадратный корень из дисперсии. Погрешность рассчитывалась по 30 независимым расчетам ($N = 30$).

В четвертом разделе диссертации описывается комплекс прикладных программ, разработанный для многоканальных многофункциональных радаров подповерхностного зондирования, созданных в рамках НИР «Водолей» и ОКР «Водолей-Э1». Структура комплекса прикладных программ «ComDia» представлена на рисунке 6.

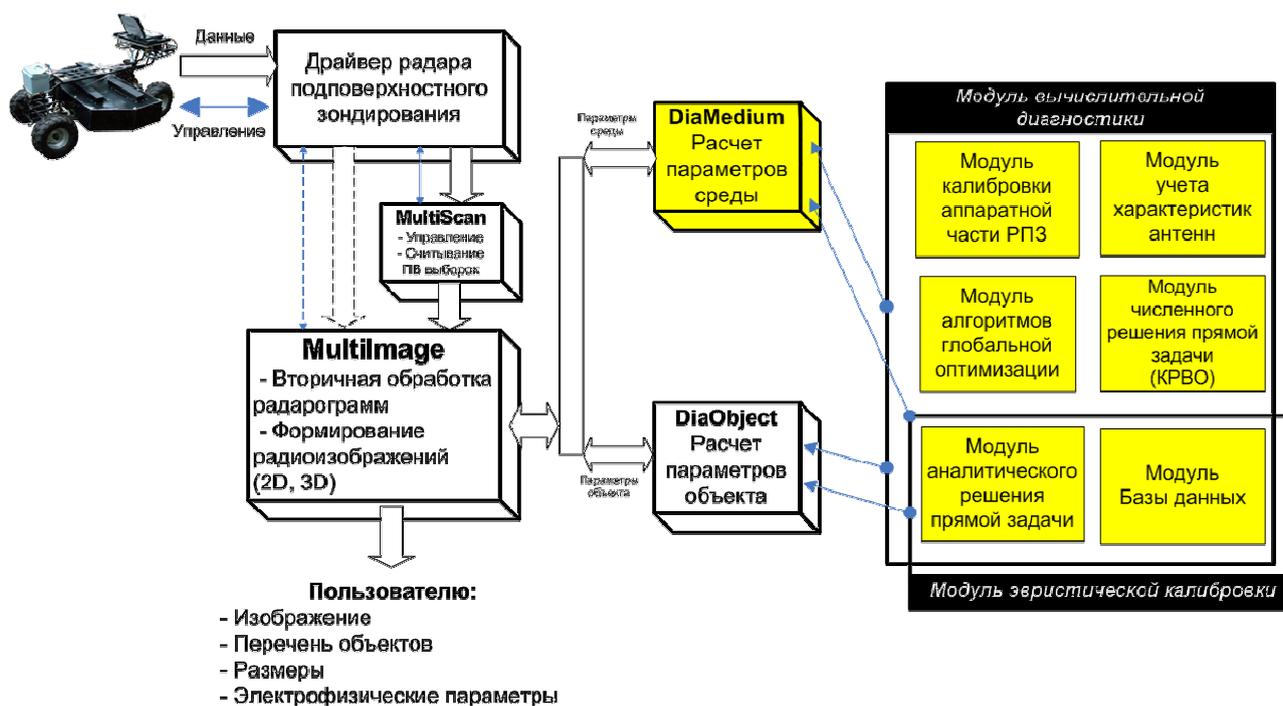


Рисунок 6 - Структурная схема комплекса прикладных программ «ComDia».

Представлена общая структурная схема комплекса прикладных программ и особенности реализации некоторых ее модулей, в частности, модуля генетического алгоритма. Показан интерфейс программы «Multiimage», а также описаны ее основные возможности.

Управление радаром подповерхностного зондирования, сбор данных, визуализация и первичная обработка (вычитание усредненной реализации) осуществляется в программе «MultiScan», которая написана на языке C++ в среде C++ Builder.

Вторичная обработка – построение двумерных и трехмерных радиоизображений, а также диагностика подповерхностных сред – реализована в программе «MultiImage», которая написана на языке C# под платформу Microsoft .NET Framework 2.0. Для отображения трехмерной графики используются OpenGL и библиотека The Tao Framework (<http://www.taoframework.com>). В программу «MultiImage» входят модули «DiaMedium» для диагностики плоскостной среды и «DiaObject» для определения параметров подповерхностных объектов.

В **пятом разделе** диссертации кратко описаны два многоканальных многофункциональных РПЗ (рисунок 7), для которых автором диссертации было разработано программное обеспечение в рамках НИР «Водолей» (госконтракт № 05/243, 2005 – 2007 гг. с в/ч 43753) и ОКР «Водолей-Э1» (госконтракт № 08/49, 2008 – 2010 гг. с в/ч 43753). Представлены их характеристики.



Рисунок 7 – Внешний вид многоканальных РПЗ подповерхностного зондирования, разработанных в рамках НИР «Водолей» (а) и ОКР «Водолей-Э1» (б).

Приведены экспериментальные исследования восстановления параметров плоскостных сред с помощью многоканального РПЗ со сверхширокополосным короткоимпульсным сигналом. Описанные процедуры калибровки, позволяют устранить мешающие переотражения в приемо-передающем тракте РПЗ, учесть нестабильность сигнала генератора, а также определить положение «виртуального центра» антенны для использования алгоритма восстановления на основе МВД – виртуального источника.

Диагностика плоскостойкой среды проведена для подповерхностной области, параметры которой представлены в таблице 5.

В соответствии с МВД, рассмотренным в разделе 2, электрофизические и геометрические параметры плоскостойкой среды определены при $\alpha = 0, q_n = 0$:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\alpha\Delta} = \left\{ \mathbf{x}_{\alpha\Delta} : \inf \left[\sum_{i=1}^{N_F} \left| H_{cp}^M(\omega_i, \mathbf{x}) - H_{cp}(\omega_i, \mathbf{x}) \right|^2 / N_F \right] \right\}, \quad (18)$$

где $H_{cp}(\omega_i, \mathbf{x})$, $H_{cp}^M(\omega_i, \mathbf{x})$ экспериментальная (измеренная) и модельная (теоретическая) передаточная функции среды соответственно.

Таблица 5

Номер слоя	Диэлектрическая проницаемость	Толщина слоя, м
1 (воздух)	1.0	0.85*
2 (песок)	4.0	0.10
3 (пенопласт)	1.0	0.105
4 (песок)	4.0	∞

* Расстояние от точки «виртуального центра» антенны до второго слоя

В рассматриваемом подходе реальная антенна РПЗ заменяется элементарным электрическим вибратором, расположенным в «виртуальной точке», координаты которой определялись экспериментально, т.е. векторная передаточная характеристика (ВПХ) реальной рупорной антенны заменяется горизонтальной компонентой ВПХ элементарного вибратора. Определения координат виртуального источника передающей антенны осуществлялось экспериментально путем регистрации во временной области рассеянного электромагнитного поля от "бесконечного" металлического экрана, находящегося в дальней зоне передающей антенны.

На рисунке 8 представлены сигнатуры 4-хслойной среды с приведенными выше параметрами, полученные на основе вычисления отраженного ЭМ поля, излучения ЭЭД на основной поляризации по плоскими Е- и Н-волнам $N_l = M_l = 40$; $N_q = M_q = 40$, и последующим их суммированием в точке с координатами $x_n = y_m = 0$, $z = z' = d_1$, а также определения аналогичной компонентой пространственной функции Грина на основе численного интегрирования в комплексной k_ρ – плоскости и на основе метода конечных разностей во временной области с использованием программы электродинамического моделирования методом КРВО.

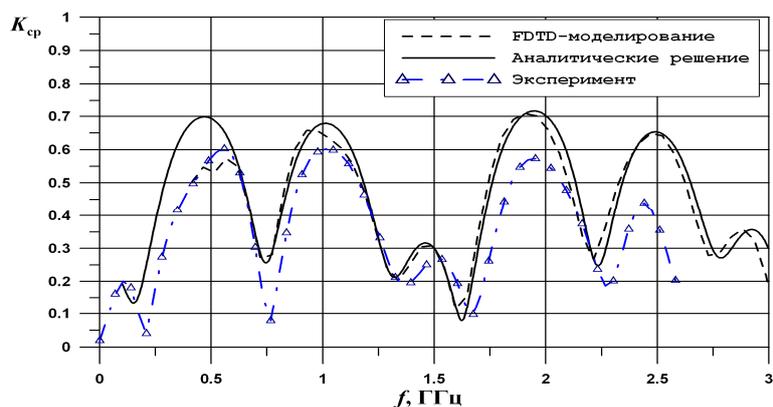


Рисунок 8 – Сигнатура плоскостройной структуры

На рисунке 9 представлены сечения минимизируемого функционала для среды, параметры которой представлены в таблице 5. Для уверенного поиска глобального минимума на основе генетического алгоритма диапазон частот зондирующего сигнала выбран $\Delta F = 1500$ МГц ($N_F = 40$) и $\Delta F = 2000$ МГц ($N_F = 55$).

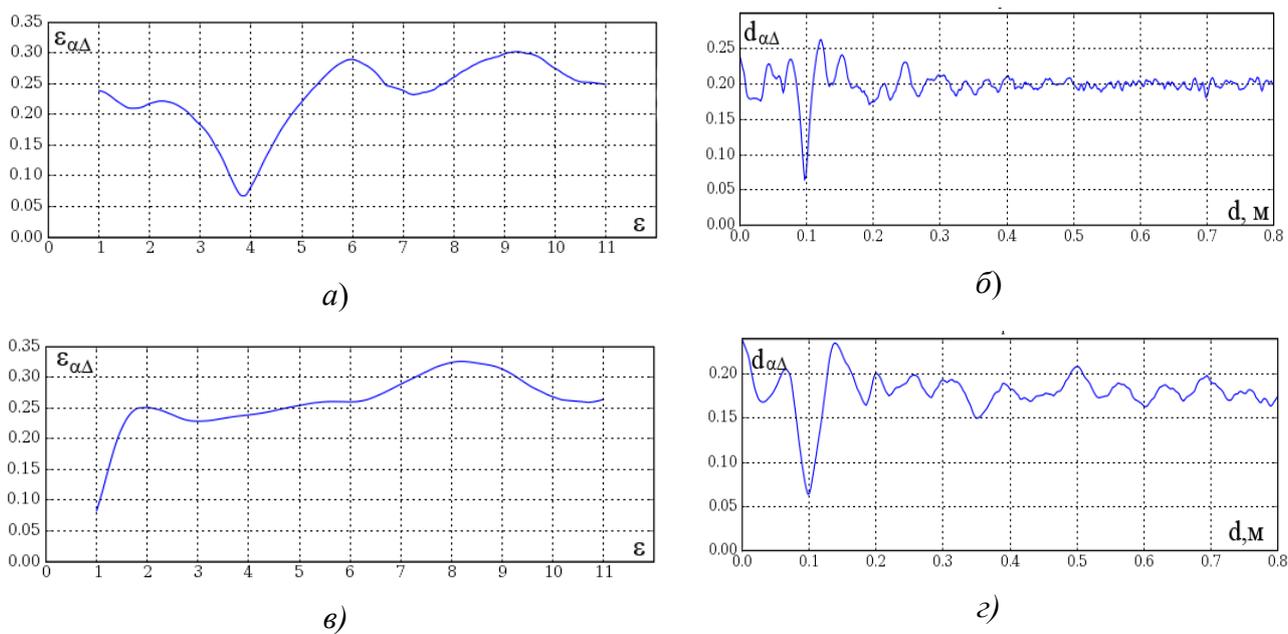


Рисунок 9 – Сечения функционала сравнения.

В таблице 6 приведены результаты восстановления параметров четырехслойной плоскостройной среды. Относительная погрешность рассчитывалась по формуле

$$\Delta_a = \frac{|a_{\text{восст}} - a_{\text{ист}}|}{a_{\text{ист}}} \cdot 100\%, \quad (19)$$

где $a_{\text{восст}}$ – восстановленное значение параметра, $a_{\text{ист}}$ – истинное значение параметра.

Таблица 6

Название параметра	Истинное значение параметра	Восстановленное значение параметра	Относительная погрешность, %
ε_2	4.0	3.86	3.5
d_2	0.1 м	0.098 м	2.0
ε_3	1.0	1.0	–
d_3	0.105 м	0.099 м	6.0

Относительная погрешность восстановления толщин и диэлектрических проницаемостей слоев не превышает 10 %.

Заключение

Диссертация посвящена развитию методов, алгоритмов обработки и программного обеспечения реконструкции электрофизических и геометрических параметров подповерхностных плоскостойких сред, зондируемых сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами, для повышения достоверности диагностики подповерхностных плоскостойких сред (дорожных покрытий и родственных объектов). Аналитический обзор по материалам отечественных и зарубежных источников по методам диагностики плоскостойких сред показал, что выбранное направление исследований является актуальным и перспективным.

В результате исследований, проведенных в рамках поставленных задач, получены следующие основные результаты.

1. Предложены и рассмотрены процедуры восстановления электрофизических и геометрических параметров среды (модель плоскостойкой среды), зондируемой СШП КИ сигналом, по измеренным дискретным пространственно-частотным выборкам рассеянного электромагнитного поля. Основная цель – повышение достоверности диагностики дорожных покрытий, взлётно-посадочных полос, мостов и других родственных объектов. Выявлены закономерности, связывающие электрофизические и геометрические параметры среды с сигнатурой (передаточной характеристикой) среды. Установлено, что эта связь описывается нелинейным интегральным соотношением. Процедуры объединяют следующие методы: метод вычислительной диагностики (МВД) для решения обратной задачи, которая сводится к нахождению безусловного экстремума сглаживающего функционала (целевой функции), представляющего невязку между результатами измерений рассеянного поля и модельной прямой задачей; метод представления функции Грина в виде суперпозиции элементарных плоских Е- и Н-волн и методе конечных разностей во временной области,

которые наиболее адекватны для моделирования комплексной сверхширокополосной электродинамической задачи: передающая антенна – слоистая среда – приёмная антенна; методы глобальной оптимизации (алгоритмы роя пчел и генетический) для минимизации невыпуклой многопараметрической целевой функции; методы калибровки аппаратной части для получения эквивалентной схемы РПЗ, позволяющей учесть искажения, вносимые передающей и приемной антеннами, а также радиочастотным трактом, в зондирующий и отраженный от среды СШП сигналы.

2. Разработан алгоритм восстановления параметров слоистой среды на основе МВД – разложении по плоским волнам. Алгоритм основан на расчете (или измерении) векторного электрического поля на плоскости в ближней зоне передающей антенны с последующим разложением этого поля по плоским Е- и Н-волнам, определении числа плоских волн, которые следует учитывать при оценке френелевских коэффициентов отражения от среды, исходя из задаваемой погрешности и трансформации рассеянного поля на выход приёмной антенны. Подобный подход позволяет определить передаточные (импульсные) характеристики прямо-передающей антенны и рассеяние от слоистой среды. Проведено электродинамическое моделирование системы передающая Т-рупорная антенна – слоистая среда – приёмная антенна методом КРВО и разложением по плоским Е- и Н-волнам для получения сигнатуры среды. Получено удовлетворительное совпадение результатов для выбранной геометрии и полосы частот.

Проведено численное моделирование и рассчитаны относительные погрешности при аппроксимации поля конечным числом плоских волн. При количестве плоских волн $N_x \times N_y = 41 \times 41$ погрешность не превышает 8 %, при $N_x \times N_y = 15 \times 15$ погрешность по полю не превышает 15 %, при $N_x \times N_y = 11 \times 11$ погрешность не превышает 25 %.

На основе рассмотренного подхода возможно моделирование поля реальных прямо-передающих антенн РПЗ, что является эффективным инструментом при решении прямой задачи диагностики плоскостойких сред.

3. Разработан алгоритм восстановления параметров слоистой среды на основе МВД – виртуальный источник. Алгоритм основан на представлении реальной антенны (Т-рупор, щелевой металлодиэлектрический неоднородный излучатель) некой “эквивалентной” антенной. При этом характеристики антенны и поле излучения, отраженное слоистой средой, отождествляется с полем, создаваемым ЭЭД. Последний расположен над поверхностью среды в точке, определяемой координатами некоторого «виртуального источника», расположенного внутри реальной антенны.

Определено поле излучения виртуального источника (ЭЭД) в виде конечного числа распространяющихся и затухающих плоских Е- и Н-волн, определены их комплексные

амплитуды и направления распространения. При этом предварительно определен критерий аппроксимации непрерывного пространственно-частотного спектра скалярной функции Грина при ее интегральном представлении конечным числом распространяющихся и затухающих плоских волн. Проведено электродинамическое моделирование системы передающая антенна (ЭЭД, Т-рупор) – слоистая среда – приёмная антенна методом КРВО и с аппроксимацией виртуальным источником для получения сигнатуры среды. Проведено восстановление всех параметров четырехслойной плоскостройной среды на основе МВД – виртуальный источник и моделирования методом КРВО с использованием алгоритма роя пчел. Показаны передаточные функции (сигнатуры) среды с заданными параметрами и среды с параметрами, восстановленными по отраженному сигналу. Полученные результаты в полосе рабочих частот показывают хорошее совпадение результатов для выбранной геометрии и полосы частот.

4. Для минимизации функционала невязки в МВД использованы алгоритмы глобальной оптимизации (генетический и алгоритм роя пчел). Последние позволяют находить глобальные экстремумы многопараметрических невыпуклых функционалов, минимизация которых с помощью итерационных алгоритмов представляют существенные трудности из-за локальных экстремумов. Проведено тестирование описываемых алгоритмов на различных целевых функциях. Тестирование на основе генетического алгоритма показало, что при соотношении сигнал-шум 17 дБ погрешность восстановления параметров трехслойной среды не превышает 10%, а при соотношении сигнал-шум 20 дБ не превышает 5%. При увеличении соотношения сигнал-шум погрешность уменьшается. Для восстановления диэлектрических проницаемостей четырехслойной среды с точностью 10% необходимо соотношение сигнал-шум 30 дБ и более, при таком соотношении сигнал-шум погрешности восстановления толщин слоев не превышают 5%.

5. Разработан комплекс прикладных программ для многоканальных многофункциональных РПЗ с зондирующим СШП КИ сигналами, реализованные в рамках НИР «Водолей» (госконтракт № 05/243, 2005 – 2007 гг. с в/ч 43753) и ОКР «Водолей–Э1» (госконтракт № 08/49, 2008 – 2010 гг. с в/ч 43753).

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять управление многоканальным РПЗ; регистрировать пространственно-временные выборки; осуществлять первичную и вторичную обработки зарегистрированной картины откликов (вычитание усредненной реализации, повышение контраста, выравнивание усиления, выделение огибающей); формировать двумерные и трехмерные радиоизображения подповерхностных объектов; осуществлять диагностику плоскостройных сред; осуществлять диагностику протяженных объектов (труб, кабелей и т.п.).

Комплекс прикладных программ включает в себя программу «MultiScan» для управления РПЗ, регистрации и первичной обработки принятых сигналов и программу «MultiImage» для вторичной обработки, формирования радиоизображений, диагностики параметров среды и объектов инфраструктуры. Описываемые в диссертации алгоритмы диагностики реализованы в виде модуля «DiaMedium», входящего в программу «MultiImage». Для реализации комплекса прикладных программ использовались следующие средства разработки: «MultiScan» написан на языке C++ в среде C++ Builder. «MultiImage» написан на языке C# под платформу .NET 2.0. Трехмерная графика выводится с помощью программного интерфейса OpenGL. В качестве оболочки для языка C# над OpenGL используется библиотека Tao Framework.

6. Реализованы процедуры калибровки РПЗ, включающие компенсацию нестабильности сигнала генератора, регистрацию отраженных сигналов в ряде тестовых режимах (отражение от «бесконечного» идеально проводящего плоского экрана, излучение антенной в свободное пространство и т.п.). Процедуры калибровки позволяют осуществить вычитание сигналов, обусловленных внутренними переотражениями в РЧ тракте и антенне, определить координату виртуального источника (необходимого при решении прямой задачи) и передаточную функцию приемо-передающей антенны.

7. Экспериментально восстановлены координаты виртуального источника приемо-передающей антенны (Т-рупор), определена ее передаточная (импульсная характеристика) и получена сигнатура (передаточная характеристика) четырехслойной плоскостойкой среды.

Экспериментально восстановлены электрофизические и геометрические параметры тестовой четырехслойной плоскостойкой среды с помощью многоканального многофункционального радара и алгоритма на основе МВД – виртуального источника. Параметры радара: длительность зондирующего сигнала – 1 нс, ширина полосы рабочих частот – 0.6 – 2 ГГц, ширина полосы захвата – 1 м, тип антенного элемента – Т-рупор. Относительная погрешность восстановления параметров слоев не превышают 10%.

Публикации по теме диссертации

1. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В. Два подхода к восстановлению параметров плоскостойких сред при короткоимпульсном сверхширокополосном зондировании. – Успехи современной радиоэлектроники, №№ 1, 2, , стр 39-50, 2009 – М.: Радиотехника.

2. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В. Моделирование зондирующих и рассеянных электромагнитных полей на основе дипольной аппроксимации характеристик антенны подповерхностного радара. – Антенны №12, 2009, стр 60-71 - М.: Радиотехника.

3. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В. Два подхода к восстановлению параметров плоскостойких сред при короткоимпульсном сверхширокополосном зондировании. – Широкополосные и сверхширокополосные сигналы и системы. Сборник статей / под. ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2009, стр 39-50.
4. Ильин Е. В. Обзор новых возможностей в Python 2.6 и 3.0. – RSDN Magazine №2.: М.: Изд.Оптим.ру, 2008, стр 17-24.
5. Гринёв А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В.. Диагностика параметров плоскостойких сред с учётом векторной пространственно-временной импульсной характеристики приёмо-передающей антенны. – Радиотехника №2, 2008, стр 3-17.
6. A. Yu. Grinev, V. S. Temchenko, E.V. Ilyin, D.V. Bagno. The restoration of road coats and related objects parameters based on method of computation diagnostics – ground penetrating radar antennas dipole approximation. XIII International Conference on Ground Penetrating Radar Lecce, Italy, June 21-25, 2010, Pp 158-162.
7. A. Yu. Grinev, A. V. Andriyanov, D. V. Bagno, V. S. Temchenko, E. V. Ilyin, D. V. Nikishov Diagnostics of Mediums and Line Objects, Probing with Ultra-wideband Short-pulse Signals // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, 2009. Pp. 294-299.
8. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Зайкин А.Е., Ильин Е.В. Особенности диагностики дорожных покрытий и родственных объектов, зондируемых сверхширокополосными короткоимпульсными сигналами – 3-я Международная конференция Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации, Суздаль, 2009, стр 103-107.
9. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В. Восстановление параметров плоскостойких сред радаром подповерхностного зондирования. Сборник докладов 14-й Международной Научно-технической Конференции "Радиолокация, навигация, связь (RLNC - 2008)". Воронеж, 2008, 1833 - 1841 стр.
10. Ильин Е.В. Многоканальный радар подповерхностного зондирования со сверхширокополосным короткоимпульсным сигналом: программное обеспечение и диагностика среды. Сборник докладов научно-технической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения д.т.н., профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР П.А.Бакулева. М.:МАИ, 2008 г., стр 9-17.
11. Ильин Е.В. Многоканальный радар подповерхностного зондирования со сверхширокополосным короткоимпульсным сигналом: программное обеспечение и диагностика среды. Тезисы докладов Всероссийской конференции молодых ученых и студентов " Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008".

12. Темченко В.С., Зайкин А.Е., Ильин Е.В. Диагностика параметров плоскостойких сред: учёт векторной пространственно-временной импульсной характеристики приёмно-передающей антенны. Сборник докладов 17-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. КрыМиКо 2007». Севастополь, Украина, 2007 г.

13. Зайкин А. Е., Борисов А. Г., Титов И. В., Ильин Е. В.. Обнаружение и интерпретация линейно-протяженного объекта с неоднородностью многоканальным радаром подповерхностного зондирования. Сборник докладов Второй всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006 г, с. 368-372.

14. Борисов А.Г., Зайкин А.Е., Титов И.В., Ильин Е.В.. Особенности обнаружения линейно-протяженного объекта с неоднородностью многоканальным радаром подповерхностного зондирования. Сборник тезисов докладов Научно-технической конференции «ЦНИИРЭС-2006»: Москва, 2006 г.

15. Гринев А.Ю., Андриянов А.В, Зайкин А. Е., Борисов А. Г., Титов И. В., Ильин Е. В. «Многоканальный радар подповерхностного зондирования: аппаратное и информационное обеспечение» Сборник докладов Юбилейной научно-технической конференции «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», посвященной 60-летию ОАО "Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца" и Факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ. ч. 1. стр. 110-119. Москва, 24-26 октября 2006.

16. Гринев А.Ю., Темченко В. С., Багно Д. В., Ильин Е. В.. «Диагностика параметров слоистых сред с учётом векторной пространственно-временной импульсной характеристики приёмно-передающей антенны» Сборник докладов Юбилейной научно-технической конференции «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», посвященной 60-летию ОАО "Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца" и Факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ. ч. 2. стр. 296-307. Москва, 24-26 октября 2006.

17. Гиголо А.И., Ильин Е.В.. Обратные задачи подповерхностного зондирования // Тезисы докладов Научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященная столетию со дня рождения Н. С. Неймана. Москва, 2005 г.