

Реконструктивная интерпретация данных подповерхностного зондирования

Лукьянов С.П., Семенчук В.Е., Карауш А.С., Потемин Р.В.

Использование в радиолокационном подповерхностном зондировании сверхширокополосных сигналов с учетом их векторной структуры позволяет строить подробные трехмерные изображения зондируемой среды. Такие изображения и их проекции на ортогональные плоскости получаются путем реконструкции импульсных характеристик различных областей среды. Реконструкция этих характеристик заключается в численном решении основного уравнения подповерхностного зондирования с использованием алгоритма регуляризации решения. Приводятся иллюстрации изображений реальной среды зондирования.

Введение

Радиолокационные системы подповерхностного зондирования, использующие сверхширокополосные (СШП) зондирующие импульсы и способные анализировать векторную структуру рассеянной волны, дают возможность получать высокоинформативные данные о зондируемой среде. Эта техническая возможность определяет задачу разработки высокоинформативных методов интерпретации полученных данных. Одним из наиболее распространенных видов такой интерпретации является реконструкция радиолокационного изображения зондируемой среды. Такая задача электромагнитной импульсной интроскопии по своему характеру является задачей вычислительной диагностики [1], постановка которой определяется операторным уравнением

$$Az = u, \quad (1)$$

где z - искомые количественные характеристики среды, u - косвенная информация об этих характеристиках, полученная посредством инструментальных измерений, которые описываются оператором A .

Таким образом, основной задачей реконструктивного подповерхностного зондирования является разработка методик измерений и вычислительных алгоритмов, которые в совокупности дают наилучшее по некоторому критерию решение обратной задачи (1).

Решение задачи реконструкции радиолокационного изображения зондируемой среды включает в себя следующие этапы:

1) определение инструментального оператора A ;

- 2) решение основного уравнения подповерхностного зондирования с применением регуляризации, то есть численное решение уравнения (1);
- 3) визуализацию результатов реконструкции.

Рассмотрение указанных этапов решения поставленной задачи целесообразно начать с определения основного уравнения подповерхностного зондирования.

1. Основное уравнение подповерхностного зондирования

При использовании СШП зондирующих электромагнитных импульсов для описания электродинамических свойств среды широкое распространение получили непараметрические модели в виде импульсных характеристик рассеяния [2]. С точки зрения такой модели объекта наблюдения задачей подповерхностного зондирования следует считать дистанционное определение функции импульсной характеристики зондируемой среды. На рис. 1 представлена структурная схема способа радиолокационного подповерхностного зондирования. Из этого рисунка видно, что измерение характеристик зондируемой среды опосредовано влиянием характеристик приемопередающего тракта РЛС и канала частичного распространения.

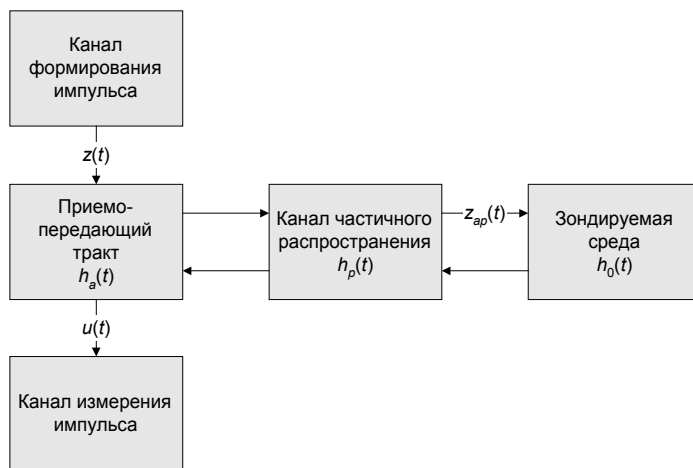


Рис.1. Структурная схема способа радиолокационного подповерхностного зондирования

С учетом рассмотренной схемы рис. 1 основное уравнение радиолокационного подповерхностного зондирования записывается следующим образом:

$$u(t) = h_a(t) * h_p(t) * h_0(t) * z(t),$$

где $h_a(t)$ - импульсная характеристика приемо-передающего тракта, $h_p(t)$ - импульсная характеристика канала частичного распространения, $h_0(t)$ - импульсная характеристика зондируемой среды, а звездочкой обозначена операция свертки.

Свертку характеристик $h_a(t)$ и $h_p(t)$ можно представить некоторой обобщенной характеристикой $h_{ap}(t)$, которая полностью определяет инструментальный оператор A в (1):

$$u(t) = h_{ap}(t) * h_0(t) * z(t). \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) относительно функции характеристики зондируемой среды $h_0(t)$ необходимо знать обобщенную характеристику приемо-передающего тракта и канала частичного распространения $h_{ap}(t)$, а также функцию сигнала $z(t)$, возбуждающего передающую антенну.

На практике чаще всего характеристику $h_{ap}(t)$ определяют путем калибровки аппаратуры с помощью эталонной цели, а функцию $z(t)$ измеряют как сигнал на выходе генератора зондирующих импульсов. Недостатки такого подхода общеизвестны. Обойти эти недостатки позволяет метод естественной калибровки.

2. Определение инструментального оператора и метод естественной калибровки

Пусть на всей площади зондирования диэлектрические свойства канала частичного распространения остаются постоянными. Пусть также диэлектрические свойства среды канала частичного распространения и зондируемой среды различаются. Тогда граница раздела среды канала частичного распространения и зондируемой среды может использоваться как регулярная неоднородность, на которой происходит рассеяние зондирующего импульса. Регулярность этой неоднородности определяется тем, что ее диэлектрические свойства не изменяются на всей площади зондирования.

Это обстоятельство позволяет предложить метод решения (2), который не требует калибровки по эталонной цели и определения $z(t)$. Этот метод назван методом естественной калибровки.

Пусть в какой-либо области зондируемая среда однородна. В этом случае рассеяния зондирующего импульса в объеме среды не происходит, и характеристика среды в этой области представима в виде:

$$h_0(t) = \delta(t), \quad (3)$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака, которая определяет регулярную неоднородность в виде границы раздела среды канала частичного распространения и зондируемой среды. Подставив (3) в (2) и учитывая фильтрующее свойство дельта-функции, получаем:

$$z_{ap}(t) = h_{ap}(t) * z(t). \quad (4)$$

Сигнал $z_{ap}(t)$ называется естественным калибровочным сигналом или просто калибровочным сигналом. Подчеркнем, что функция $z_{ap}(t)$ в оговоренных условиях получается путем измерения рассеянного сигнала при зондировании однородной, не содержащей объектов наблюдения, среды.

С учетом (4) зондирование любой i -области среды описывается выражением:

$$u_i(t) = h_{0i}(t) * z_{ap}(t), \quad (5)$$
$$i = 1.. N,$$

где N - количество областей зондирования.

Из выражения (5) может быть найдена искомая характеристика i -ой области зондируемой среды $h_{0i}(t)$.

В зависимости от используемых в аппаратуре подповерхностного зондирования информационных параметров электромагнитной волны, можно выделить две разновидности метода естественной калибровки: скалярную и векторную естественную калибровку. Любым реализациям метода естественной калибровки свойственно одно общее достоинство: они не предъявляют особых требований к зондирующей аппаратуре. Это достоинство определяется тем, что метод естественной калибровки реализуется в виде вычислительных процедур компьютерных программ обработки, которые иногда предполагают специальные методики проведения зондирования.

В качестве информационных параметров сигнала скалярная естественная калибровка использует мгновенные энергетические величины рассеянной волны без учета их векторной природы. Скалярная естественная калибровка может быть реализована путем применения двух стратегий получения калибровочного сигнала: получением калибровочного сигнала специальным зондированием той области среды, где среда наиболее однородна, и получением калибровочного сигнала путем усреднения результатов зондирования всего района наблюдения.

Векторная естественная калибровка предполагает одновременное зондирование среды идентичными с точки зрения временной функции сигналами, которые не интерферируют в этой среде [3]. В качестве таких сигналов можно использовать ортогональные поляризационные компоненты зондирующего сигнала. Для сохранения общности результатов вид поляризационных ортогональных компонент волны (линейные, круговые, эллиптические) не конкретизируется. Учитывая широкий частотный спектр СШП импульсов, анизотропия локальных неоднородностей может рассматриваться как анизотропия вещества и (или) асимметрия рассеивающего сечения профильной функции локальной неоднородности. Кроме того, использование разнесенных передающей и приемной антенн позволяет использовать эффект поляризации волны, падающей на поверхность рассеяния под углом. Характеристики поляризации волны в этом случае определяются формулами Френеля [4].

Таким образом, если поляризующие свойства границы зондируемой среды проявляются слабее поляризующих свойств объектов наблюдения в этой среде, то одна из поляризационных компонент рассеянной волны может быть использована в качестве естественного калибровочного сигнала.

Все иллюстрации практического применения алгоритмов реконструкции и визуализации будут использовать один и тот же набор данных подповерхностного зондирования. Приведем условия этого зондирования. Прямоугольная область наблюдения характеризуется размерами $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$. Среда области наблюдения - сухой песок. Объект наблюдения установлен во вмещающей среде на глубине 0.3 м и представляет собой полый полиэтиленовый диск с металлической осью. Внешний диаметр диска равен 0.25 м, толщина равна 0.07 м.

3. Решение основного уравнения подповерхностного зондирования

Рассмотрение электродинамических свойств зондируемой среды на основе импульсных характеристик рассеяния (см. п.2) предполагает, что инструментальный оператор A в выражении (1) имеет вид интеграла свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_A(t - \tau)z(\tau)d\tau = u(t),$$

где $h_A(t)$ - импульсная характеристика канала распространения, $z(t)$ - электрический сигнал на выходе формирователя зондирующего импульса, $u(t)$ - электрический сигнал на входе измерителя рассеянного сигнала (см. рис. 1).

Применение метода естественной калибровки (5) позволяет записать основное уравнение подповерхностного зондирования в следующей форме:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_{0i}(t - \tau)z_{ap}(\tau)d\tau = u_i(t), \quad (6)$$

$$i = 1.. N,$$

где $h_{0i}(t)$ - импульсная характеристика i -ой области зондируемой среды, $z_{ap}(t)$ - калибровочный сигнал на входе измерителя рассеянного сигнала, полученный одним из методов естественной калибровки.

Реконструкция радиолокационного изображения заключается в нахождении импульсных характеристик i -ых областей зондируемой среды $h_{0i}(t)$ и визуализации полученных данных. Численное решение интегрального уравнения (6) осложняется некорректностью рассматриваемой задачи по Адамару [1, 5]. Задача реконструкции импульсной характеристики зондируемой среды является некорректной по следующим причинам:

1. Элемент u получается путем аппаратных измерений и поэтому известен лишь приближенно. Приближенное решение в общем случае не принадлежит множеству AZ . В этом случае не выполняется требование корректности относительно существования решения (1) и, следовательно, (6).
2. Обратный оператор к вполне непрерывному интегральному оператору (6) не является непрерывным [5], поэтому решение (1) и (6), даже если оно существует, не будет обладать свойством устойчивости, что нарушает требование корректности.

На рис. 2 представлена импульсная характеристика среды, в той ее области, где содержится объект наблюдения. Эта характеристика получена как результат решения обратной задачи (6) без применения регуляризации.

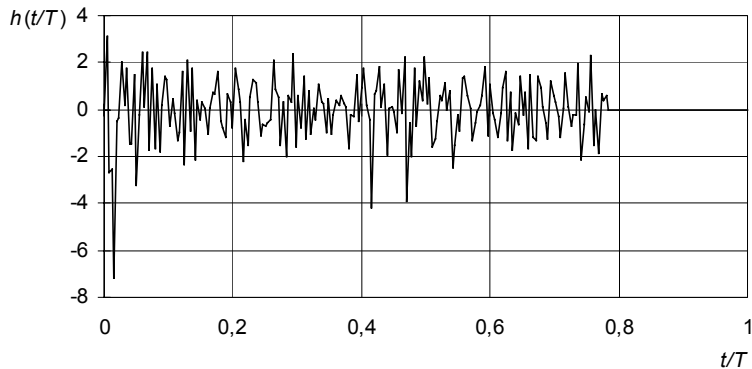


Рис. 2. Результат определения импульсной характеристики среды без применения регуляризации, $T = 29$ нс

На графике рис. 2 интенсивный шум является следствием неустойчивости полученного решения к небольшим отклонениям исходных данных от точных значений.

Проведем решение (6) в частотной области. Для регуляризации этого решения, следуя [5], введем под интеграл обратного преобразования Фурье стабилизирующий множитель:

$$z_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\omega, \alpha) \frac{U(\omega)}{H_{0i}(\omega)} e^{i\omega t} d\omega, \quad (7)$$

где стабилизирующий множитель $f(\omega, \alpha)$ устраняет неустойчивость решения и определяется следующим выражением:

$$f_i(\omega, \alpha) = \frac{|H_{0i}(\omega)|^2}{|H_{0i}(\omega)|^2 + \alpha},$$

$U(\omega)$ - частотный спектр функции $u(t)$, $H_{0i}(\omega)$ - частотная характеристика i -ой области зондируемой среды, α - параметр регуляризации.

Определение величины параметра регуляризации α является многокритериальной задачей. Для ее решения авторы вводят понятие качества регуляризации, которое рассматривается в узком и широком смысле.

1. В узком смысле: качество регуляризации - это величина отклонения в некоторой метрике реконструированного решения от теоретического;
2. В широком смысле: качество регуляризации - это величина, характеризующая различимость двух заданных мод функции импульсной характеристики зондируемой среды.

Для количественной характеристики различимости двух заданных мод функции $z(t)$ в точках a и b введем безразмерный показатель различимости мод:

$$\xi(a, b) = 1 - \frac{C_{a,b}}{\sqrt{m_{2,a}m_{2,b}}},$$

где

$$C_{a,b} = \frac{2}{b-a} \int_a^{\frac{a+b}{2}} \left| z(t)z\left(t + \frac{b-a}{2}\right) \right| dt,$$

$$m_{2,a} = \frac{2}{b-a} \int_a^{\frac{a+b}{2}} z^2(t) dt,$$

$$m_{2,b} = \frac{2}{b-a} \int_{\frac{a+b}{2}}^b z^2(t) dt.$$

Показатель различимости мод принимает значения от 0 до 1. Он равен нулю в том случае, когда в точках a и b функция $z(t)$ не имеет экстремумов и равен 1, когда поведение функции $z(t)$ в точках a и b можно аппроксимировать дельта-функцией Дирака.

Авторами проведены модельные исследования зависимости показателя различимости мод от уровня шума и формы зондирующего импульса. Например, результаты изучения влияния шума на величину показателя различимости в случае прямоугольного импульса постоянной энергии представлены на рис. 3.

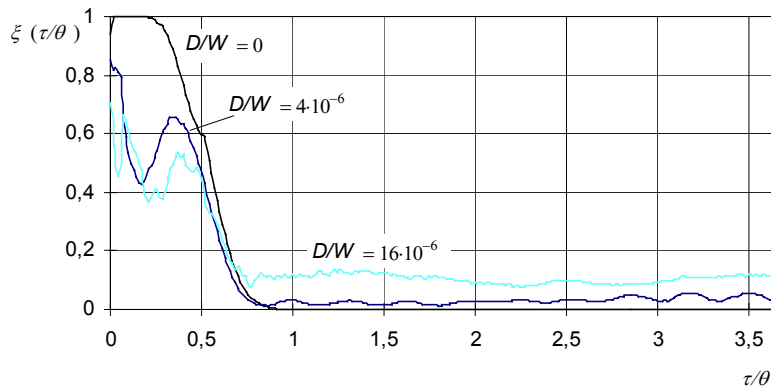


Рис. 3. Зависимость показателя различимости от отношения τ/θ в случае зондирующего импульса постоянной энергии для различных величин отношения D/W , параметр регуляризации α равен 0.01

Здесь τ - длительность зондирующего импульса, θ - время, за которое электромагнитная волна в конкретной среде проходит расстояние от одного центра рассеяния объекта зондирования до другого, D - дисперсия шума, W - энергия импульса.

При одном и том же параметре регуляризации увеличение уровня шума снижает максимально достижимые значения показателя различимости. С увеличением уровня шумов снижается стабильность изменения функции показателя различимости относительно асимптоты, что объясняется большой чувствительностью показателя различимости к шумам. Диапазон значений τ/θ , в котором наблюдаются относительно большие значения ξ , при увеличении уровня шума не изменяется (см. рис. 3).

Проведенные модельные исследования позволяют при заданных величинах длительности зондирующего импульса, уровня шумов во всем тракте распространения импульса и требуемой разрешающей способности системы подповерхностного зондирования найти значение параметра регуляризации α .

На рис. 4 приведен график регуляризованного решения (6), полученного по формуле (7), для области среды, содержащей объект наблюдения.

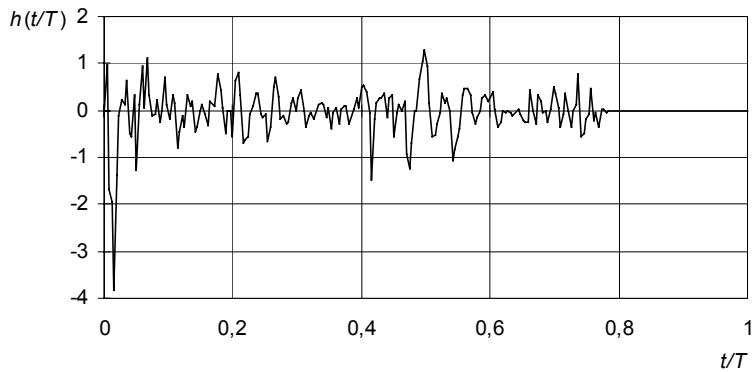


Рис. 4. Результат определения регуляризованной импульсной характеристики среды с параметром регуляризации $\alpha = 10$, $T = 29$ нс

4. Визуализация результатов реконструкции

Визуализация результатов реконструкции осуществляется в программном модуле визуализации данных, входящем в состав программной системы апостериорной обработки данных подповерхностного зондирования. Этот модуль позволяет строить на экране компьютера трехмерное изображение подповерхностной среды, задавая любой ракурс наблюдения этой среды, строить проекции трехмерной картины на три взаимно перпендикулярные плоскости. Кроме этого, модуль предоставляет различные средства программной обработки и преобразования изображений. Основная идея, которую преследовали авторы при создании модуля визуализации, заключается в том, чтобы интерпретировать данные зондирования в наиболее естественной для человека форме.

На рис. 5 представлено трехмерное реконструированное изображение зондируемой среды, в которой находится объект наблюдения. На этом изображении хорошо видны верхняя и нижняя поверхности объекта наблюдения. Используемый ракурс трехмерной картины позволяет увидеть радиолокационное изображение поверхности зондируемой среды, что дает повод использовать подобные РЛС для обзора поверхности земли.

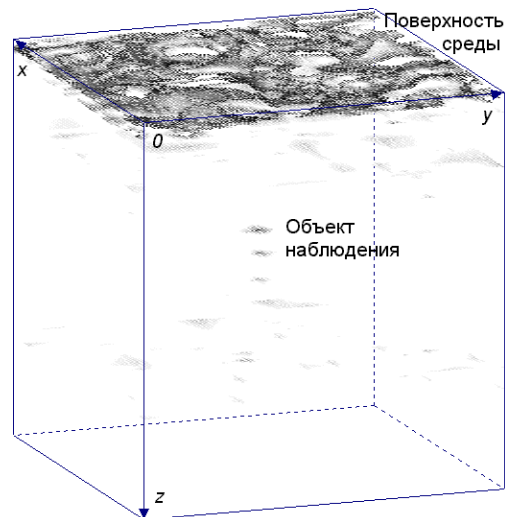


Рис. 5. Реконструированное трехмерное изображение подповерхностного пространства, содержащего объект наблюдения

На рис. 6 приведены проекции полученного трехмерного изображения. Здесь проекции изображения могут анализироваться в координатной системе, соответствующей условиям наблюдения. В частности, могут быть определены диаметр, толщина объекта наблюдения и его глубина установки во вмещающей среде.

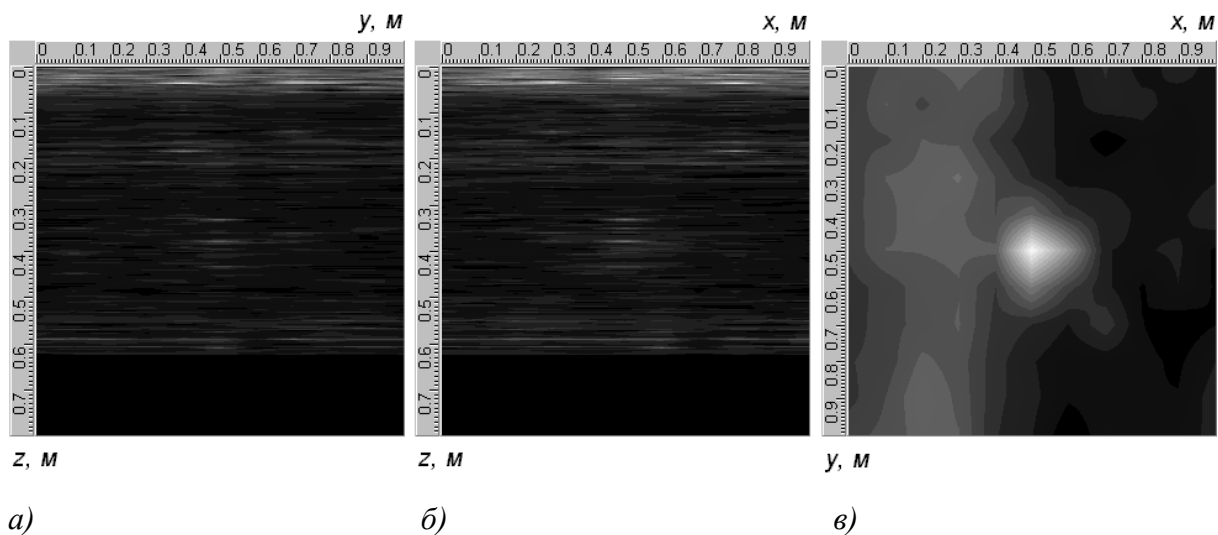


Рис. 6. Проекции реконструированного трехмерного изображения на ортогональные плоскости: а) фронтальная проекция, б) боковая проекция, в) горизонтальная проекция

В настоящее время реконструкция радиолокационного изображения среды становится необходимым этапом в обработке данных подповерхностного зондирования. С одной стороны, это определяется растущим требованием более полного и комплексного учета

высокоинформативных данных, полученных при зондировании среды СШП импульсами, а с другой - постоянным ростом вычислительной мощности и снижением стоимости универсальных вычислительных средств. Таким образом, радиотехнические и программные системы, построенные на основе алгоритмов реконструктивного подповерхностного зондирования, становятся частью коммерческих продуктов, спрос на которые с каждым днем возрастает.

Список литературы

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические задачи компьютерной томографии. - М.: Наука, 1987. - 160 с.
2. Кенно Е.М., Моффат Д.Л. Аппроксимации переходных и импульсных переходных характеристик. - ТИИЭР, 1965, том 53, № 8. - с. 1025 - 1034.
3. Лукьянов С.П., Семенчук В.Е., Ильюшенко В.Н. Поляризационное сверхразрешение по глубине в задачах дистанционного зондирования полупроводящих сред. - Изв. вузов. Физика, 1997, № 1, с. 72 - 76.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970. - 856 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.

Лукьянов Сергей Павлович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

В 1975 г. окончил Томский институт АСУ и радиоэлектроники. Работал в этом ВУЗе старшим научным сотрудником. В 1987 защитил кандидатскую диссертацию. В 1989 был приглашен на работу в Сибирский физико-технический институт на должность старшего научного сотрудника. С 1996 г. является доцентом кафедры Радиоприемных и усилительных устройств Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Научные интересы: анализ и синтез систем бортовой радиолокации, систем подповерхностного зондирования, поляризационная обработка сигналов, алгоритмы функционирования систем и отображения информации.

Сибирский физико-технический институт им. Кузнецова.

Семенчук Владимир Евгеньевич,

В 1985 г. окончил Томский институт АСУ и радиоэлектроники. Работал в этом ВУЗе ассистентом кафедры конструирования и производства РЭА. С 1994 г. старший преподаватель кафедры биомедикибернетики Сибирского государственного медицинского университета. Научные интересы: программирование систем, цифровая обработка сигналов, машинная графика.

Сибирский государственный медицинский университет.

Карауш Александр Сергеевич,

В 1996 г. окончил Томский институт АСУ и радиоэлектроники . После окончания института был приглашен работать младшим научным сотрудником в Сибирский Физико-технический институт. Научные интересы: проектирование сверхширокополосных устройств, конструирование РЭА для подповерхностного зондирования.

Сибирский физико-технический институт им. Кузнецова

Потемин Роман Валерьевич,

В 1997 г. окончил Томский институт АСУ и радиоэлектроники . После окончания института был приглашен работать младшим научным сотрудником в Сибирский Физико-технический институт. Научные интересы: цифровая обработка сигналов, разработка и проектирование преобразующих устройств на основе цифровых сигнальных процессоров.

Сибирский физико-технический институт им. Кузнецова