

**В.П. Якубов, Е.Д. Тельпуховский, Г.М. Цепелев, А.В. Клоков,  
Н.А. Моисеенко, С.Н. Новик, Д.Я. Суханов, О.В. Якубова**

## Радиолокационная томография

*Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований по локационному зондированию неоднородных сред и объектов с использованием как многочастотного сканирования в сверхширокой полосе (от 0,5 до 17 ГГц), так и наносекундных и субнаносекундных импульсов. Показано, что дополнение измерений угловым и пространственным сканированием с последующим синтезированием большой апертуры позволяет реализовать трехмерную томографию слабоконтрастных неоднородностей с пространственным разрешением порядка 1 см. В основе обработки данных лежат физические модели взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в которых выделяются доминирующие механизмы. Это позволяет существенно упростить решение обратных задач и использовать быстрые алгоритмы их реализации. Фокусировка излучения осуществляется с использованием зеркал, линз, а также методов трехмерной согласованной и винеровской фильтрации с регуляризацией. Приводятся примеры, подтверждающие работоспособность метода для бесконтактной томографии структуры леса, обнаружения и визуализации противопехотных мин, скрытых под неровной поверхностью песка. Дается описание разработанных экспериментальных установок. Показано, что использование сверхширокополосного излучения позволяет значительно повысить точность измерений при сохранении реального масштаба времени обработки данных.

### Введение

Одно из перспективных направлений современной радиоволновой томографии связано с использованием сверхширокополосного (СШП) излучения. Такое излучение позволяет, во-первых, реализовать высокое разрешение по глубине зондирования и, во-вторых, обеспечить достаточную глубину проникновения излучения в среды с поглощением. В конечном счете, это дает возможность реализовать высокое пространственно-временное разрешение зондируемой среды и фактически выйти на радиовидение оптически непрозрачных неоднородных сред и объектов [1]. Дополнение зондирующей системы пространственным или угловым сканированием позволяет реализовать 3-D-томографию в режиме одностороннего (локационного) доступа. Такая задача является актуальной, например, при подземной локации, при дефектоскопии инженерных сооружений, в дорожном строительстве, при поиске людей и техники в завалах, при геологических разработках и т.д. Особенно актуальным представляется использование методов сверхширокополосного зондирования в связи с задачами, возникающими в последнее время для обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом.

В данной статье представлены результаты последних экспериментальных исследований по локационному зондированию неоднородных сред и объектов с использованием как многочастотного сканирования в сверхширокой полосе (от 0,5 до 17 ГГц), так и наносекундных и субнаносекундных импульсов. В качестве зондируемых объектов выступают корпус диэлектрических противопехотных мин, установ-

ленных во влажном песке, и лесной массив средней плотности.

### Теоретические модели

Рассмотрим сначала задачу о подповерхностной локационной томографии. Для построения удобной математической модели примем ряд упрощений. Будем считать, что поверхность земли плоская, а неоднородности среды нижнего полупространства  $V_1$  характеризуются малым относительным изменением диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon(\mathbf{r})$ . Поясним основную идею метода в простейшем случае однократного рассеяния при условии, что точки излучения и приема совпадают между собой и с точкой  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, h)$ , которая может перемещаться на высоте  $h = \text{const}$  в воздухе над границей раздела.

Горизонтальное положение этой точки описывается двумерным вектором  $\mathbf{r}_0(x_0, y_0)$ . Для комплексной амплитуды рассеянного поля (передаточной функции системы) в точке приема  $\mathbf{r}_0$  можно записать следующее выражение:

$$E(\mathbf{r}_0, f) = k_1^2 \iiint_{V_1} \Delta\epsilon(\mathbf{r}_1, z_1) G^2(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0, z_1) d^2\mathbf{r}_1 dz_1, \quad (1)$$

где

$$G(\mathbf{r}, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{iT(\mathbf{k}) \exp[i(\mathbf{k}_\perp \mathbf{r} + k_z h + k_{1z} z)]}{2(2\pi)^2 k_z} d^2\mathbf{k}_\perp \quad (2)$$

— функция Грина, описывающая поле в нижнем полупространстве от точечного источника, расположенного

в верхнем полупространстве;  $k = 2\pi f/c$  — волновое число для свободного пространства;  $T(\mathbf{k})$  — френелевский коэффициент прохождения границы раздела сред для спектральных составляющих плоских волн. Величины  $k_z = \sqrt{k^2 - k_\perp^2}$  и  $k_{1z} = \sqrt{k^2 n^2 - k_\perp^2}$  представляют собой вертикальные составляющие волновых векторов для падающей  $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_\perp, k_z)$  и преломленной  $\mathbf{k}_1 = (\mathbf{k}_\perp, k_{1z})$  плоских волн для верхнего и нижнего полупространств соответственно. Положение текущей точки рассеяния определяется вектором  $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1) \equiv (\boldsymbol{\rho}_1, z_1)$ , а его проекция на границу раздела — вектором  $\boldsymbol{\rho}_1 = (x_1, y_1)$ . При записи (1) предполагается, что фоновый показатель преломления  $n$  нижней среды известен.

Будем исходить из того, что в результате многопозиционных измерений получено распределение рассеянного поля  $E(\boldsymbol{\rho}_0, f)$  над поверхностью. Для получения объемного распределения неоднородностей проведем фокусировку поля (1) в некоторую точку на границе раздела сред  $\boldsymbol{\rho}_F$ . Как известно, операция фокусировки заключается в синфазном сложении комплексных амплитуд рассеянного поля в выбранной точке фокусировки. Результат фокусировки рассеянного поля в некоторую поверхностную точку  $\boldsymbol{\rho}_F$  можно записать с помощью интеграла типа свертки:

$$F(\boldsymbol{\rho}_F, f) = \iint_S E(\boldsymbol{\rho}_0, f) M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_0,$$

где

$$M(\boldsymbol{\rho}, f) = \exp\left[-ik_0 \left(2\sqrt{\boldsymbol{\rho}^2 + h^2}\right)\right]$$

— соответствующая весовая функция фокусировки, а интегрирование ведется по всей плоскости наблюдений  $S$ , которая и представляет собой плоскость синтезируемой апертуры.

С учетом представления (1) сфокусированное поле можно записать в виде

$$F(\boldsymbol{\rho}_F, f) = \iiint_{V_1} \Delta\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1, z_1) Q(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f) d^3 \mathbf{r}_1, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} Q(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f) &= \\ &= k_1^2 \iint_S G^2(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_0, z_1) M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_0 \end{aligned} \quad (4)$$

является откликом системы на точечный рассеиватель, расположенный в точке  $\mathbf{r}_1$ , т.е. это аппаратная функция системы на частоте  $f$  при фокусировке в поверхностную точку  $\boldsymbol{\rho}_F$ . Здесь учтено, что в случае большой апертуры  $S$  функция  $Q(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f)$  зависит только от значения разностного радиус-вектора  $\boldsymbol{\rho} \equiv \boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1$ .

Результаты численного расчета показывают, что в среде с большим фоновым показателем преломления аппаратная функция имеет форму коллимированного волнового пучка, распространяющегося практически перпендикулярно к границе раздела сред.

Это приближение тем точнее, чем больше показатель преломления  $n$  исследуемой среды. При этом выражение для  $k_{1z}$  упрощается:

$$k_{1z} = \sqrt{k^2 n^2 - k_\perp^2} \approx kn = k_1,$$

и возникающий в (2) множитель  $\exp(ik_{1z} z)$  выносится за знак интеграла. В результате получаем

$$F(\boldsymbol{\rho}_F, f) = \int_{-\infty}^0 \exp(i2knz_1) \iint \Delta\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1, z_1) Q_\perp(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 dz_1, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} Q_\perp(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, f) &= Q(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, z_1 = 0, f) = \\ &= \iint_S M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) G_\perp^2(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_0) d^2 \boldsymbol{\rho}_0 \end{aligned}$$

имеет смысл поперечной аппаратной функции системы на частоте  $f$ .

Применим к (5) преобразование Фурье по всем частотам, на которых проводятся измерения. В итоге

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\boldsymbol{\rho}_F, t) &\equiv \int F(\boldsymbol{\rho}_F, f) \exp(-i2\pi f t) df = \\ &= \iiint_{V_1} \Delta\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1, z_1) \tilde{Q}_\perp\left(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, \frac{ct}{2n} - z_1\right) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 dz_1, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_\perp\left(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, \frac{ct}{2n} - z_1\right) &\equiv \\ &\equiv \int Q_\perp(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, f) \exp[-i2\pi f(t - 2nz_1/c)] df. \end{aligned}$$

В рамках принятых приближений для восстановления пространственного распределения неоднородностей  $\Delta\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1, z_1)$  достаточно записать решение интегрального уравнения в свертках (6). Это известная задача, которая обычно решается с использованием винеровской фильтрации с регуляризацией. Однако установленный факт хорошей локализации аппаратной функции системы позволяет в первом приближении с точностью до постоянного множителя считать, что

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_F, z_F) &\approx \tilde{F}(\boldsymbol{\rho}_F, 2nz_F/c) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i2knz_F) \iint_S E(\boldsymbol{\rho}_0, f) M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_0 df. \end{aligned} \quad (7)$$

Величина пространственного разрешения при этом определяется масштабом локализации аппаратной функции системы.

С учетом принятых приближений решение обратной задачи подповерхностной томографии сводится к фокусировке излучения в приповерхностную точку среды и к операции обратного преобразования Фурье по частоте. Использование алгоритма быстрого преобразования Фурье позволяет значительно ускорить эту обработку данных измерений,

что особенно важно, например, для поиска противопехотных мин.

В случае остронаправленной антенной системы или когда пространственное сканирование трудно реализуемо, например при зондировании лесов, целесообразным является использование схемы углового сканирования и импульсного зондирования. При этом обработка данных предполагает четыре этапа: 1) временное сжатие рассеянного сигнала на основе согласованной фильтрации с использованием в качестве опорного — сигнала, отраженного от углового отражателя; 2) выделение огибающей (амплитуды) отраженного сигнала, в качестве которой берется модуль соответствующего аналитического сигнала; 3) выравнивание сигнала по дальности на основе перенормировки с учетом ослабления по дальности и 4) снятие углового размытия изображения, обусловленного конечностью угловой ширины диаграммы направленности. На последнем этапе используется операция деконволюции с регуляризацией, а в качестве эталонной функции направленности используется отклик локационной системы на угловой отражатель.

## Экспериментальные результаты

Для проведения подповерхностного зондирования был изготовлен специальный бокс, покрытый изнутри радиопоглопителем (рис. 1, а).

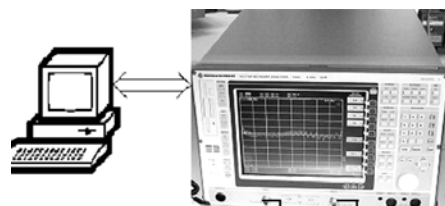
Эксперимент был проведен с погруженными на разную глубину четыремя тестовыми диэлектрическими объектами: корпусами пластиковых противопехотных мин и ступенчатым объектом из пенопласта с размером ступенек 5 см. Объекты представлены на рис. 2, а.

В ходе измерений использовался диапазон частот от 0,5 до 17 ГГц. Система из приемной и передающей антенн, закрепленных между собой на расстоянии 14 см, перемещалась шагом 1 см в горизонтальной плоскости по квадрату 50×50 см на высоте 30 см.

Для обработки многочастотных данных использован описанный выше алгоритм. Результаты восстановления формы тестовых объектов и их глубины обнаружения показаны на рис. 2, б [2]. Заметим, что время восстановления полной трехмерной томограммы на глубину до 50 см не превышало 30 с, что приблизительно на два порядка меньше достигнутого при использовании высокопроизводительного 64-bit процессора на Sun Ultra-1 workstation, когда для получения подобного результата потребовалось около 4 ч в Объединенном исследовательском центре Европейской комиссии в Италии [3].

Подтверждением достигнутого пространственного разрешения, позволяющего говорить о реально достигнутом радиовидении объектов, является томографический срез, взятый из полной 3-D-картины на уровне границы раздела «воздух — грунт» (рис. 3, б).

Для сравнения на рис. 3, а показана эта граница. На обоих изображениях отчетливо виден след неровностей в виде символа «W».



а

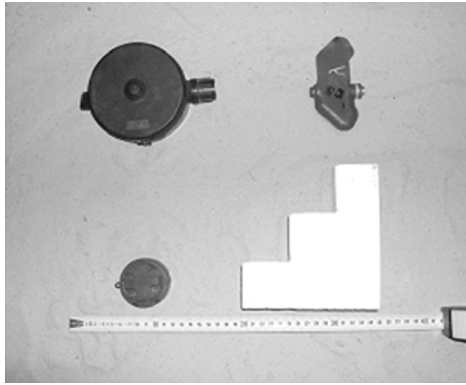


б

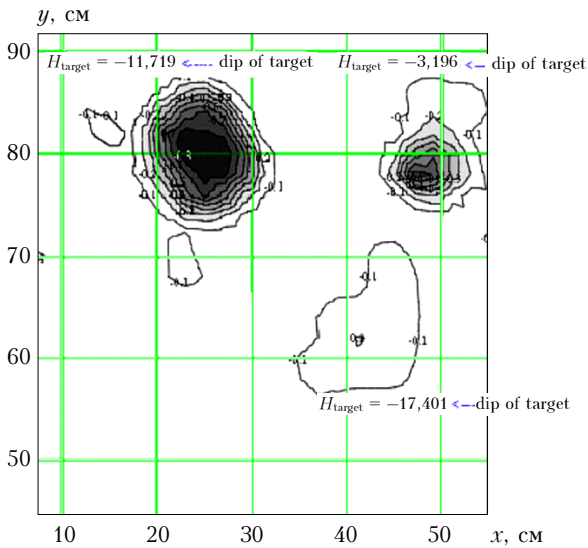
Рис. 1. Экспериментальные установки для локационной томографии

В этой связи следует подчеркнуть, что в предложенной схеме зондирования и обработки данных два принципиально неустраняемых отрицательных фактора в бесконтактной подповерхностной локации — неровности рельефа и высокий контраст диэлектрических свойств сред (воздуха и грунта) — впервые использованы как положительные для уменьшения мешающих отражений границы и ускорения алгоритма обработки без потери точности.

Достигнутый результат был получен во многом благодаря использованию специальной СШП-антенны конструкции Ю.И. Буянова (рис. 4, а), которая отличается от своих аналогов рекордно широкой полосой рабочих частот.



*a*



*б*

Рис. 2. Внешний вид и радиотомограмма тестовых диэлектрических объектов

Это подтверждает измеренная зависимость (рис. 4, б) коэффициента стоячей волны (*VSWR*) для одной из приведенных антенн. Видно, что вплоть до частоты 17 ГГц этот коэффициент не превышал значения 1,5. Эти же антенны были использованы в качестве облучателей параболических зеркал при томографии леса (см. рис. 1, б).

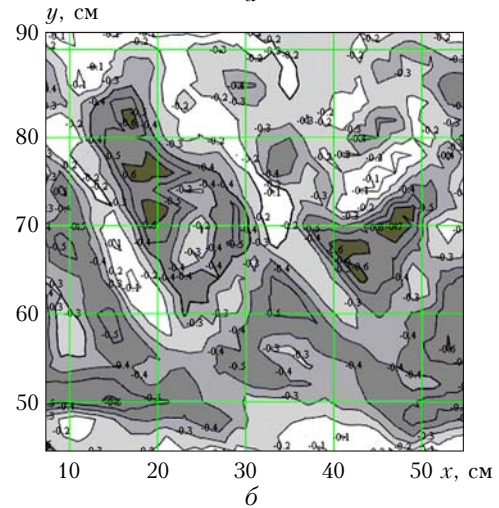
Зондирование эталонного участка лиственничного леса (рис. 5, *a*) проводилось на полигоне Института леса КНЦ СО РАН по двум схемам: с использованием поднятого над лесом и помещенного внутрь леса радаров импульсного СШП-излучения (см. рис. 1, б).

На основе полученных данных удалось существенно расширить известные представления о физике распространения радиоволн в лесной среде [4–8].

Для обработки отраженных негармонических сигналов использовалась теория аналитического сигнала. В соответствии с этой теорией под амплитудой СШП-сигнала понимался модуль соответствующего аналитического сигнала. Усреднение проводилось по всем частотам, занимаемым зондирующим сигналом, т.е. от 500 МГц до 17 ГГц. Заметим, что радарный СШП-сигнал можно использовать для анализа частотной дисперсии коэффициента поглощения леса.

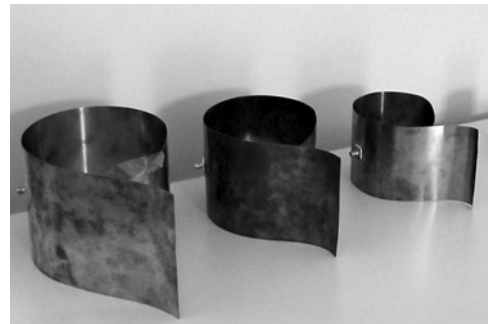


*a*

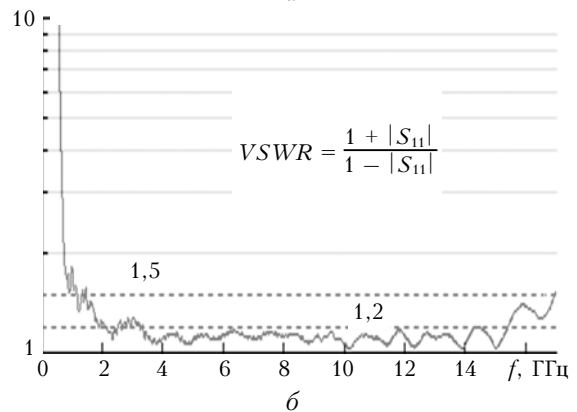


*б*

Рис. 3. Внешний вид и радиоизображение неровной поверхности песка



*a*

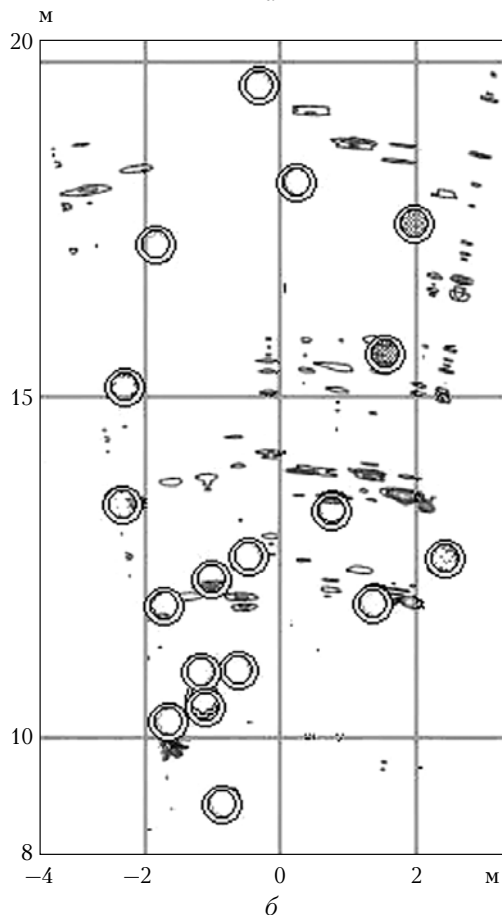


*б*

Рис. 4. Внешний вид СШП-антенн конструкции Ю.И. Буянова и их характеристика



*a*



*б*

Рис. 5. Лиственный лес и его радиотомограмма

Для этого достаточно провести полосовую фильтрацию радарного отклика вблизи выбранных частот

и оценить скорость убывания выделенных составляющих с расстоянием.

Результат восстановления томограммы эталонного участка леса по описанному в теоретическом разделе алгоритму с согласованной фильтрацией, перенормировкой по аналитическому сигналу и деконволюцией показан на рис. 5, б в виде градаций серого цвета. Окружностями обозначено местоположение деревьев на независимо снятом ландшафтном плане исследуемого участка леса.

Видно, что наблюдается достаточно хорошее согласие (приблизительно в 70% случаев) полученных результатов с ландшафтным планом вплоть до положения отдельных деревьев. Видно, что на томограмме кроме выделенных деревьев видны некоторые дополнительные неоднородности, которые, возможно, связаны с крупными ветками лесного полога, не отмеченными на ландшафтном плане. Кроме того, определенные погрешности могли быть допущены при снятии самого ландшафтного плана. Полагаем, что после выполнения многократных измерений и более тщательной обработки данных СШП-измерения могут быть использованы для снятия самого ландшафтного плана, а также для обнаружения посторонних предметов в лесу, например замаскированной техники, животных или людей.

## Заключение

Проведенные исследования показали перспективность радиотомографического метода локации с использованием СШП-радиоизлучения. При использовании полосы частот от 0,5 до 17 ГГц удается обеспечить реальное пространственное разрешение неоднородностей порядка 1 см.

Авторы выражают благодарность профессору А.С. Омару и руководству Магдебургского университета (Lehrstuhl für Hochfrequenz- und Kommunikationstechnik am Institut für Elektronik, Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg) за предоставленную возможность проведения высокоточных измерений на современной аппаратуре.

Работа поддержана на разных этапах Межотраслевой программой Министерства образования и Министерства обороны РФ № 03.01.028, грантом РФФИ № 01-02-17233-а, ФЦП «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 годы» № И0106.120, грантами Министерства образования РФ № Т00-2.4-2119 и Е00-12.0-249, грантом УР.01.01.395 по программе «Университеты России» и ФЦНТП № 02.438.11.7008 Федерального агентства по науке и инновациям РФ 2005–2006 гг.

1. *Вопросы подповерхностной радиолокации* / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
2. *Yakubov V.P., Omar A.S., Kutov V.P., Spiliotis N.G., Suhanov D.Y. New Fast SAR Method for 3-D Subsurface Radiotomography* // Tenth Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, 21–24 June, 2004. Delft, the Netherlands. P. 103–106.



3. *Fortuny-Guasch J.* A Novel 3-D Subsurface Radar Imaging Technique // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2002. V. 40. N 2. P. 443–452.
4. *Магазинникова А.Л., Якубов В.П.* Дуальный механизм распространения радиоволн в условиях леса // Радиотехн. и электрон. 1999. Т. 44. № 1. С. 5–9.
5. *Yakubov V.P., Telpukhovskiy E.D., Mironov V.L., Sarabandi K., Tsepelev G.M.* Wideband Radar Phenomenology of Forest Stands // IGARSS'2003. France. 2003. P. 4265–4267.
6. *Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Цепелев Г.М.* Импульсное зондирование лесного полога // Изв. вузов. Физ. 2003. № 8. С. 36–41.
7. *Yakubov V.P., Telpukhovskiy E.D., Mironov V.L., Tsepelev V.M., Moiseenko N.A.* Measured Spectrum and Polarization of Wideband Radar Signal from Forest Stand // IGARSS'2004. Anchorage Alaska. 2004. P. 3471–7473.
8. *Клоков А.В., Якубов В.П.* Импульсная широкополосная томографии леса // Изв. вузов. Физ. 2005. № 6. С. 121–122.

*V.P. Yakubov, E.D. Telpuchovski, G.M. Tsepelev, A.V. Klokov, N.A. Moiseenko, S.N. Novik, D.Ya. Suhanov, O.V. Yakubova.* **Radar tomography.**

Results of experimental researches on radar sounding of non-uniform mediums and objects with the use of both multi frequency scanning in a UWB band (from 0,5 up to 17 GHz), and sub nanosecond impulses are considered. It is shown, that the addition of measurements by angular and spatial scanning with SAR technologies allows one to realize 3-D tomography of weak-contrast inhomogeneities with spatial resolutions about 1 cm at the physical models of interaction of electromagnetic radiation with the substance, in which dominating mechanisms are allocated. This allows one to simplify essentially the decision of inverse problems and to use fast algorithms of their realization. Focusing of radiation is carried out with use of mirrors, lenses, and methods of 3-D coordinated filtrations with regularization. The examples confirming working capacity of a method for contact-free tomography of structure of a forest, detection and visualization the landmines hidden under a rough surface of sand. The description of the developed experimental of installations is given. It is shown, that using of UWB radiation allows one to raise considerably accuracy of measurements at preservation of a real time scale of data processing.