

07;09;12

Восстановление трехмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений

© Д.Я. Суханов, К.В. Завьялова

Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: sdy@mail.tsu.ru

(Поступило в Редакцию 15 июня 2011 г.)

Предложен метод получения трехмерных радиоизображений на основе измерения амплитуды интерференции поля опорной и предметной волн перемещаемым приемопередающим модулем со сканированием в широкой полосе частот. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований предложенной системы радиовидения в диапазоне частот от 1 до 13 GHz.

Введение

Системы радиовидения [1] имеют множество перспективных приложений, таких как контроль качества на производстве, медицинская диагностика, системы бесконтактного досмотра. Существует потребность в создании дешевых и быстродействующих систем радиовидения. Наиболее качественные трехмерные радиоизображения с разрешением, близким к дифракционному пределу, позволяет получить технология радара с синтезированной апертурой (РСА) с применением сверхширокополосных сигналов. Однако недостатком данной технологии является ее высокая стоимость, обусловленная необходимостью измерения фазы с применением СВЧ-смесителей и фильтров. Методы цифровой голографии позволяют получить пространственное разрешение, сравнимое с технологией РСА, и не требуют устройств измерения фазы волны, но не способны получить разрешение по дальности [2,3]. В некоторых работах предлагаются методы трехмерной голографии, например, в [4] рассматривается возможность получения разрешения по дальности, однако для этого используется механически регулируемая система линз.

В настоящей работе предложен радиоголографический метод получения радиоизображений, основанный на измерении амплитуды интерференционной картины опорного и предметного сигналов на различных частотах в широкой полосе, а также быстрый алгоритм обработки данных измерений для восстановления трехмерных радиоизображений. При этом не используется фокусировка с помощью линз и системы зеркал для направления опорной или предметной волн.

1. Постановка задачи и решение прямой задачи

Рассматривается следующая схема измерений (рис. 1). Передающая и приемная антенны находятся друг от друга на фиксированном расстоянии d и образуют приемопередающий модуль. Приемопередающий модуль

перемещается с определенным шагом в плоскости xOy и производит измерения амплитуды поля на различных частотах. Передающая антенна подключена к перестраиваемому генератору монохроматических сигналов и излучает радиоволны в сторону исследуемого объекта и в сторону приемной антенны. Волна, отраженная от объекта (предметная волна), интерферирует с прямой волной от источника (опорной волной). К приемной антенне подключен детекторный диод, с помощью которого через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) измеряется интенсивность (квадрат амплитуды) волны. Измерения производятся при излучении монохроматического сигнала, затем частота монохроматического сигнала изменяется, и измерения повторяются, таким образом реализуются широкополосные радиоголографические измерения.

Для описанной схемы измерений предлагается математическая модель, которая позволяет определить результат измерений по заданному распределению неоднородностей в среде, т.е. решение прямой задачи. Рассматривается скалярное приближение однократного рассея-

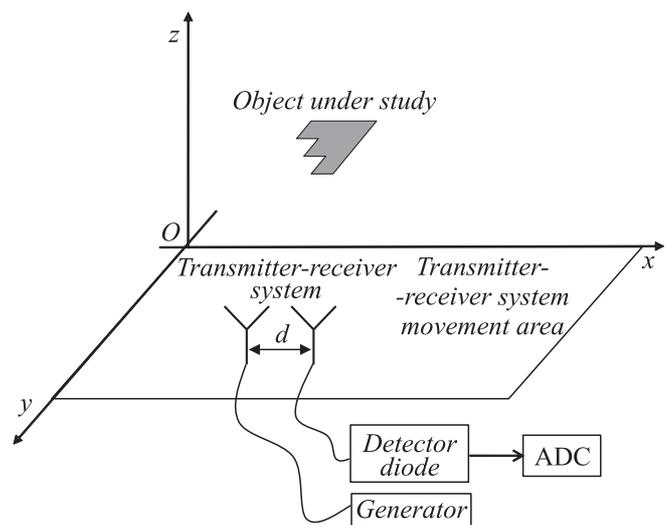


Рис. 1. Схема измерений.

ния. Представим объект как множество изотропных точечных рассеивателей, которое описывается трехмерной скалярной функцией $\rho(x, y, z)$.

Поле в приемной антенне на частоте f можно записать следующим образом:

$$U(x, y, z) = A \iiint_V \rho(x', y', z') \frac{\exp(ik(r_1 + r_2))}{(4\pi)^2 r_1 r_2} dx' dy' dz' + \hat{B} \frac{\exp(ikd)}{4\pi d} = AS_1(x, y, z) + BS_0(f), \quad (1)$$

где первое слагаемое описывает предметную волну $S_1(x, y, f)$, а второе слагаемое — опорную $S_0(f)$, причем $|A_0(f)| = 1$; нормирующие коэффициенты A и $B = \hat{B}/4\pi d$ описывают соотношение амплитуд предметной и опорной волн; $r_1 = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 + z'^2}$ — расстояние от передающей антенны до точки в объеме интегрирования, $(x_0, y_0, 0)$ — координата источника, $r_2 = \sqrt{(x' - (x_0 + d))^2 + (y' - y_0)^2 + z'^2}$ — расстояние от приемной антенны до точки в объеме интегрирования, $(x_0 + d, y_0, 0)$ — координата приемной антенны.

Сигнал из приемной антенны поступает в детектор, сигнал с которого оцифровывается в АЦП. Будем считать, что напряжения на входе АЦП пропорциональны интенсивности поля в приемной антенне

$$\begin{aligned} W(x, y, f) &= |U(x, y, f)|^2 \\ &= [AS_1(x, y, f) + BS_0(f)][AS_1(x, y, f) + BS_0(f)]^* \\ &= A^2|S_1|^2 + B^2|S_0|^2 + ABS_1S_0^* + ABS_1^*S_0 \\ &= A^2|S_1|^2 + B^2|S_0|^2 + 2AB[\operatorname{Re}(S_1)\operatorname{Re}(S_0) + \operatorname{Im}(S_1)\operatorname{Im}(S_0)]. \end{aligned} \quad (2)$$

2. Восстановление трехмерных радиоизображений

Используя измеренную функцию $W(x, y, f)$, необходимо восстановить изображение рассеивателей в среде $\rho(x, y, z)$. Заметим, что информация о рассеивающих объектах содержится в функции $S_1(x, y, f)$, которая входит в $W(x, y, f)$. В выражении (2) учтем, что амплитуда опорной волны (B) много больше амплитуды предметной волны (A), тогда первым слагаемым в формуле (2) можно пренебречь. Также величины B и $S_0(f)$ априорно известны и являются неизменными характеристиками измерительной системы. Для удобства решения обратной задачи (восстановления трехмерного изображения объекта) введем новую функцию:

$$\begin{aligned} \tilde{W}(x, y, f) &= \frac{W(x, y, f) - B^2|S_0|^2}{2B} \\ &= A[\operatorname{Re}(S_1)\operatorname{Re}(S_0) + \operatorname{Im}(S_1)\operatorname{Im}(S_0)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{W}(x, y, f)$ содержит информацию о фазе S_1 с точностью до π , но такой точности определения фазы

достаточно для восстановления изображений методом пространственно согласованной фильтрации.

Рассмотрим величину

$$\tilde{S}_1 = \tilde{W}(x, y, f) \exp(ikd). \quad (4)$$

Величина \tilde{S}_1 является комплексной величиной и имеет фазу, близкую к фазе S_1 с точностью до $\pm \frac{\pi}{2}$, а также амплитуду, равную $|\tilde{W}(x, y, f)|$, которая не больше чем $A|S_1|$.

Изображение рассеивающих объектов восстанавливается путем пространственно согласованной фильтрации (фокусировки) функции $\tilde{S}_1(x, y, f)$. Пространственно согласованный фильтр имеет вид

$$H(x, y, z, f) = \frac{\exp(-ik(r_1 + r_2))}{(4\pi)^2 r_1 r_2}, \quad (5)$$

где $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $r_2 = \sqrt{(x - d)^2 + y^2 + z^2}$.

Трехмерное изображение восстанавливается следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(x, y, z) &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \iint_S \tilde{S}_1(x', y', f) H(x - x', y - y', z, f) dx' dy' df. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет получить трехмерное изображение, которое пропорционально коэффициенту рассеяния объектов в исследуемом пространстве $\rho(x, y, z)$. Однако использование выражения (6) на практике затруднено, поскольку оно требует значительных вычислительных ресурсов. Для решения данной проблемы предлагается быстродействующий алгоритм трехмерной фокусировки.

3. Быстродействующий алгоритм трехмерной фокусировки

Рассмотрим спектр плоских волн функции \tilde{S}_1 :

$$\hat{S}(k_x, k_y, k) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_1(x, y, f) \exp(ik_x x + ik_y y) dx dy, \quad (7)$$

где $k = 2\pi f/c$ — волновое число свободного пространства, которое по сути заменяет в нашем описании частоту.

Поскольку пространственно согласованная фильтрация (6) является интегралом свертки по пространственным координатам, то в спектре плоских волн интегрирование по x и y может быть представлено в виде умножения

$$\hat{V}(k_x, k_y, k) = \hat{S}(k_x, k_y, k) \hat{H}(k_x, k_y, k), \quad (8)$$

где

$$\hat{H}(k_x, k_y, z, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y, z, f) \exp(ik_x x + ik_y y) dx dy. \quad (9)$$

Вычислим интеграл (9) приближенно с помощью метода стационарной фазы [5]. Для простоты вычисления будем приближенно считать, что $d \ll x, y, z$, а также в (5) будем считать знаменатель слабо меняющейся функцией, которую можно заменить константой, следовательно, выражение (5) можно упростить

$$H(x, y, z, f) \approx C \exp(-ik2r), \quad (10)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, C — некоторая действительная константа.

Тогда точка стационарной фазы в интеграле (9) имеет следующие координаты:

$$x = \frac{k_x z}{\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}}, \quad y = \frac{k_y z}{\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}},$$

следовательно, из (9) приближенно без учета амплитудных множителей получаем пространственный спектр согласованного фильтра

$$\hat{H}(k_x, k_y, z, k) \approx \tilde{C} \exp\left[-iz \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}\right]. \quad (11)$$

Таким образом, из (8) можно записать решение обратной задачи:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(x, y, z) &\sim \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{V}(k_x, k_y, k) \exp(-ik_x x - ik_y y) dk dk_x dk_y \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{S}(k_x, k_y, k) \hat{H}(k_x, k_y, k) \exp(-ik_x x - ik_y y) dk dk_x dk_y \\ &\cong \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{C} \hat{S}(k_x, k_y, k) \exp(-ik_x x - ik_y y - iz \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}) dk dk_x dk_y. \end{aligned} \quad (12)$$

Для быстрого вычисления интеграла (12) предлагается свести его к трехмерному преобразованию Фурье, которое может быть вычислено с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Введем в интеграле (12) замену переменной интегрирования следующим образом:

$$\alpha = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2},$$

отсюда

$$k = \frac{\sqrt{\alpha^2 + k_x^2 + k_y^2}}{2}, \quad dk = \frac{\alpha d\alpha}{2\sqrt{\alpha^2 + k_x^2 + k_y^2}},$$

следовательно, интеграл (12) примет вид

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(x, y, z) &\sim \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{C} \hat{S}\left(k_x, k_y, \frac{\sqrt{\alpha^2 + k_x^2 + k_y^2}}{2}\right) \\ &\times \frac{\alpha \exp(-ik_x x - ik_y y - iz\alpha)}{2\sqrt{\alpha^2 + k_x^2 - k_y^2}} d\alpha dk_x dk_y. \end{aligned} \quad (13)$$

Интеграл (13) фактически является трехмерным обратным преобразованием Фурье из области пространственных частот (k_x, k_y, α) в область пространства (x, y, z) . Модуль функции $\tilde{\rho}(x, y, z)$ является искомым трехмерным изображением исследуемой среды.

Предложенный метод был смоделирован численно для диапазона частот от 5 до 10 GHz на области пространства $1 \times 1 \times 1$ м. Источник и приемник разнесены на расстояние 10 см и перемещаются вместе на области 1×1 м, с шагом 4 мм. Исследуемая неоднородность представляется в виде плоского объекта ступенчатой формы с размером ступеньки 5 см (рис. 2), расположенного на расстоянии 30 см от области сканирования.

Для представленного объекта было произведено численное моделирование результата измерений предложенной радиоголографической системой (рис. 3). На рисунке можно видеть характерную голографическую интерференционную картину.

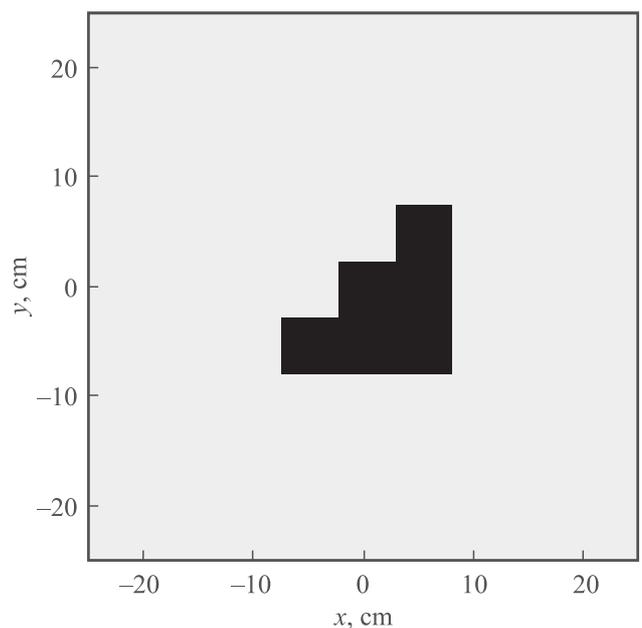


Рис. 2. Изображение исследуемого объекта.

Используя результат решения прямой задачи (рис. 3) и формул (3), (4), (7) и (13), было произведено восстановление трехмерного изображения исследуемого объекта. На рис. 4 представлено сечение восстановленного трехмерного изображения плоскостью, параллельной xOy от дальности $z = 30$ см.

На рис. 5 представлен вид восстановленного изображения по оси z при $x = 0$, $y = 0$. Из представленных рисунков можно видеть, что достигнуто разрешение,

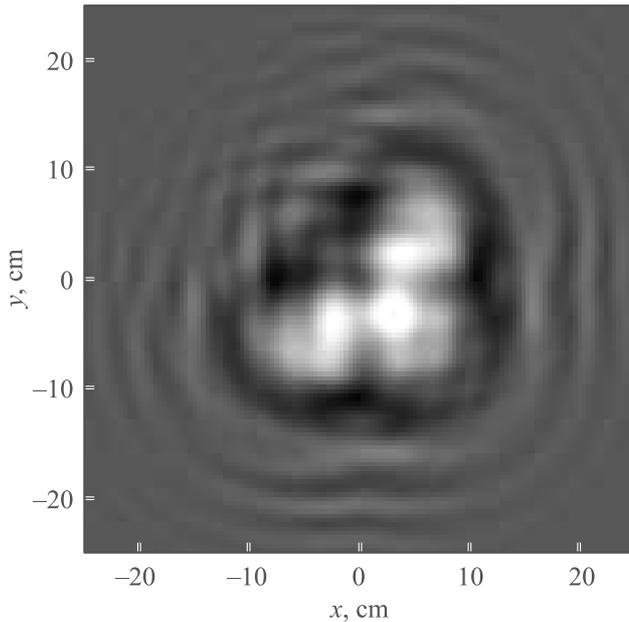


Рис. 3. Численно смоделированный результат измерений на входе АЦП.

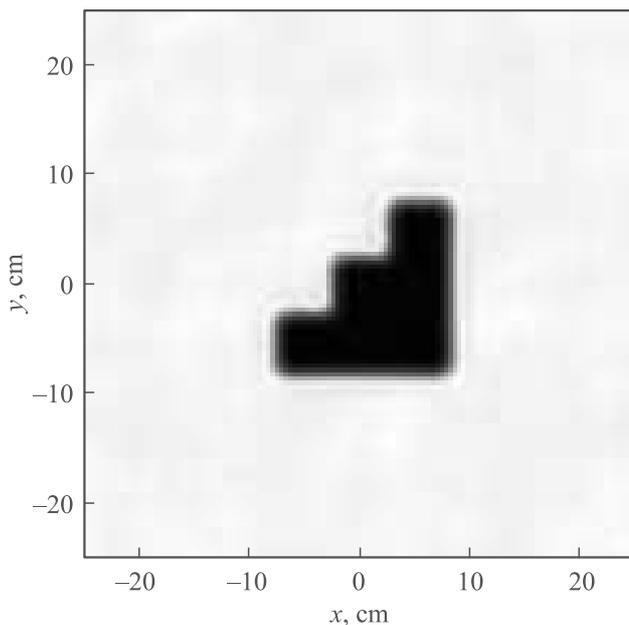


Рис. 4. Результат восстановления изображения исследуемого объекта в плоскости xOy .

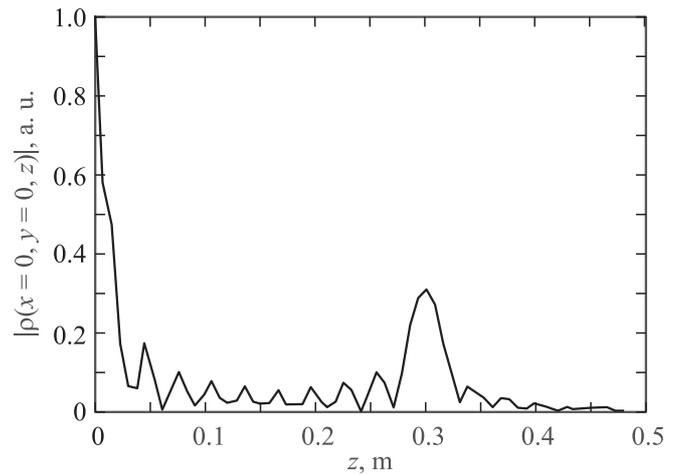


Рис. 5. Вид восстановленного трехмерного изображения по оси z для демонстрации разрешения по дальности.

близкое к дифракционному пределу для систем с синтезированием апертуры. В данном случае разрешение в плоскости сканирования около 15 mm. Достигнутое разрешение по дальности составляет около 6 см, которое определяется шириной используемой полосы частот. Для используемой полосы в 5 GHz теоретический предел разрешающей способности по дальности составляет 6 см.

Таким образом, численное моделирование показывает принципиальную возможность получения трехмерных радиоизображений путем измерения только амплитуды поля на различных частотах при сканировании в широкой полосе частот. Трехмерное изображение, полученное предложенным способом, имеет качество, сравнимое с изображениями, получаемыми методами на основе технологии синтезирования апертуры с измерением фазы. Процедура восстановления трехмерного изображения сводится к трехмерному быстрому преобразованию Фурье.

4. Экспериментальные исследования

Эксперимент проводился в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. В эксперименте использовался диапазон частот от 1 до 13 GHz с шагом 200 mHz. Измерения проводились для металлического объекта ступенчатой формы (рис. 2), с размером ступеньки 5 см, на удалении 40 см от области сканирования. Сканирование производилось на области 40×40 см с шагом 1 см. Результат измерений амплитуды поля на частоте 10 GHz представлен на рис. 6.

Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью метода, предложенного в разд. 3. В результате было получено изображение тестового объекта (рис. 7).

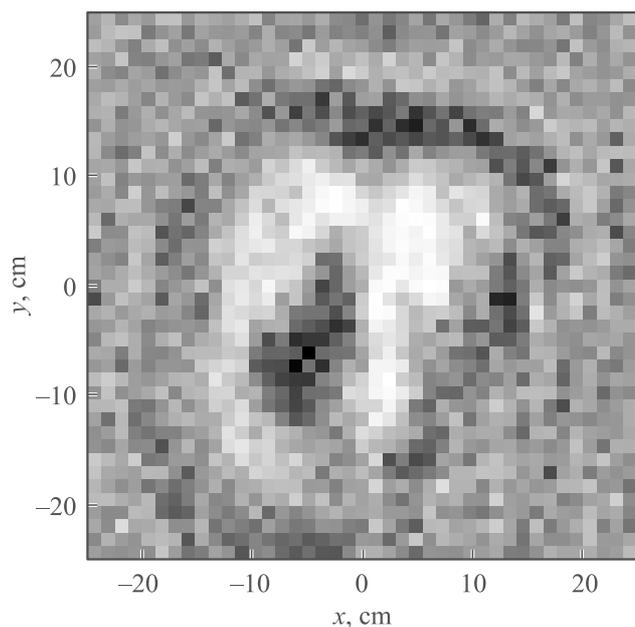


Рис. 6. Негативное изображение измеренной амплитуды поля на частоте 10 GHz.

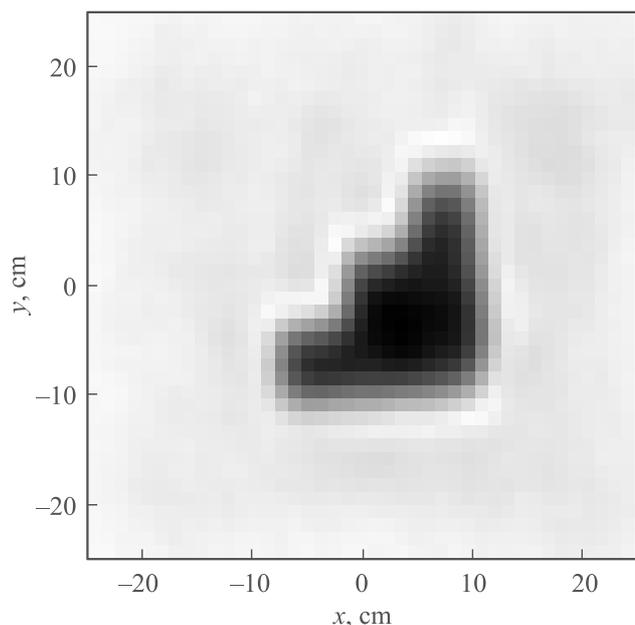


Рис. 7. Результат восстановления изображения тестового объекта.

Можно видеть, что получено разрешение в плоскости порядка 15–20 мм, что близко к дифракционному пределу для использованного диапазона частот.

5. Заключение

Предложен метод трехмерного радиовидения на основе измерения амплитуды поля интерференции предметного и опорного сигналов одиночным приемопередаю-

щим модулем, перемещающимся в плоской прямоугольной области, при последовательном измерении на различных частотах в широкой полосе. Обработка данных измерений реализуется на основе быстрого преобразования Фурье, благодаря чему обработка данных может происходить в режиме реального времени (в процессе измерений). Разрешение получаемых радиоизображений близко к теоретическому пределу для широкополосных радиолокаторов с синтезированной апертурой. Применительность предложенного метода подтверждена экспериментально.

Авторы выражают благодарность за помощь в изготовлении элементов экспериментальной установки А.В. Трясову.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ за 2009–2013 гг. в рамках мероприятий 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“ мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339 и при поддержке ФЦП мероприятие 1.1 „Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров“, ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010–2012).

Список литературы

- [1] Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Уч. пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
- [2] Gorodetsky A.A., Bespalov V.G. // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7601. P. 760107–1.
- [3] Bespalov V.G., Gorodetsky A.A. // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7233. P. 72330G–1.
- [4] Gelsinger-Austin/P.J., Luo Y., Watson J.M., Kostuk R.K., Barbastathis G., Barton J.K., Castro J.M. // Opt. Eng. 2010. Vol. 49. N4. P. 043 001.
- [5] Федорюк М.В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. 367 с.