

01;09;12

## Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии

© Д.Я. Суханов, В.П. Якубов

Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 22 июля 2009 г.)

Предложен метод восстановления трехмерных изображений рассеивающих неоднородностей по результатам широкополосного многопозиционного радиозондирования в миллиметровом диапазоне с использованием сигналов с линейной частотной модуляцией. Для реализации метода предложен алгоритм, основанный на быстром преобразовании Фурье, обеспечивающий обработку данных в реальном масштабе времени. Приводятся результаты численного моделирования, а также результаты обработки экспериментальных данных и восстановленные изображения тестовых объектов.

### Введение

Основная задача радиотомографии — это дистанционное бесконтактное исследование скрытых объектов и их внутренней структуры. Радиотомографические системы могут найти применение в системах безопасности для досмотра людей с целью предотвращения провоза и хранения оружия, взрывчатых веществ и других запрещенных предметов. Также радиотомография может найти применение в системах контроля качества и целостности промышленных изделий. Радиоволновые методы относительно безопасны для человека и позволяют обнаруживать широкий класс объектов, в том числе диэлектрических. Широкополосные радиотомографические системы исследования скрытых объектов, основанные на технологии радара с синтезированной апертурой, позволяют получать трехмерные изображения рассеивающих объектов при одностороннем локационном зондировании [1,2]. Радиозондирование в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн позволяет визуализировать скрытые объекты с разрешением в несколько миллиметров [1], чего достаточно для идентификации большинства предметов.

Для получения разрешения по дальности при локационном зондировании необходимо использовать широкополосные сигналы. Одним из используемых в радиолокации типов широкополосных сигналов является сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [3]. ЛЧМ-сигналы применяются в радиолокации и гидролокации [4], в радиолокаторах для исследования состояния ионосферы [5]. Использование ЛЧМ-сигнала позволяет упростить оцифровку радиолокационных данных. С помощью смесителя принимаемого и передаваемого ЛЧМ-сигнала получается сигнал на разностной частоте, который можно оцифровать, используя низкочастотные аналого-цифровые преобразователи, причем разностная частота прямо пропорциональна дальности до рассеивающего объекта. В настоящей работе предлагается развитие этого метода для синтезирования большой апертуры по данным многопозиционного радиозондирования и на этой основе решается задача радиолокационной томо-

графии — задача восстановления трехмерной структуры пространственно распределенных рассеивающих объектов.

### Постановка задачи

Рассматривается следующая схема зондирования исследуемой среды. Приемопередающая антенна перемещается в плоскости  $X-Y$  (рис. 1) с определенным шагом. В каждой точке  $r_0$  происходит излучение радиосигнала с линейной частотной модуляцией. Будем считать, что прием сигнала, рассеянного неоднородностями в исследуемой среде, производится в той же точке  $r_0$ . Сигнал с приемной антенны поступает на смеситель, где умножается на сигнал с генератора и подается на фильтр низких частот. Далее производится оцифровка низкочастотного сигнала со смесителя с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Оцифрованный сигнал поступает в электронно-вычислительную машину (ЭВМ) для обработки. Используя поступившие данные, необходимо восстановить трехмерное изображение рассеивающих неоднородностей в среде, или, другими словами, получить радиотомограмму исследуемой среды [1,2].

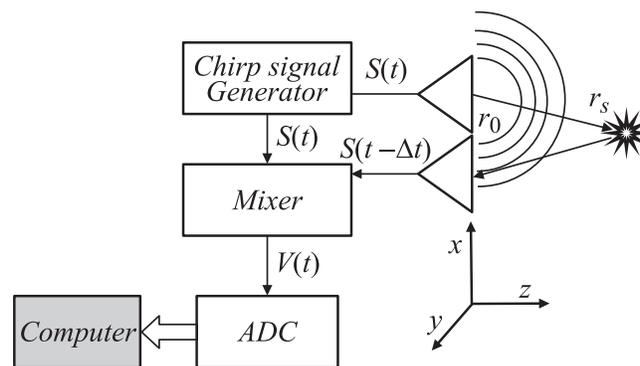


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы.

Запишем ЛЧМ-сигнал в следующем виде:

$$S(t) = A \exp(i[\alpha t^2 + \omega_0 t]), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — минимальная частота сигнала,  $\alpha$  — коэффициент линейного изменения частоты со временем,  $A$  — амплитуда сигнала.

Рассмотрим реакцию зондирующей системы на точечный рассеиватель в среде, расположенный в точке  $\mathbf{r}_S$  при использовании ЛЧМ-сигнала. Предполагается, что рассеянный сигнал поступает на смеситель, где соединяется с сигналом, излучаемым в текущий момент времени. Приблизительно работа смесителя описывается с помощью операции умножения.

Исходя из (1) сигнал после смесителя можно записать в виде

$$U(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_S, t) = B \exp(-i[2\alpha\Delta t t - \alpha\Delta t^2 + \omega_0\Delta t]), \quad (2)$$

где  $\Delta t = \frac{2}{c}|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_S|$  — время возвращения рассеянного сигнала;  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, 0)$  — положение приемопередающей антенны;  $\mathbf{r}_S = (x_S, y_S, z_S)$  — координаты точечного рассеивателя в среде;  $B$  — амплитуда рассеянного сигнала.

В приближении однократного рассеяния для распределения рассеивающих неоднородностей с весовой функцией  $\rho(\mathbf{r}_S)$  можно приближенно записать полное рассеянное поле, преобразованное смесителем:

$$E(\mathbf{r}_0, t) = \int_{\mathbf{r}_S} \rho(\mathbf{r}_S) U(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_S, t) d\mathbf{r}_S. \quad (3)$$

Выражение (3) приближенно соответствует результату измерений при многопозиционном зондировании.

На рис. 2 представлена действительная часть результата численного моделирования сигнала после смесителя

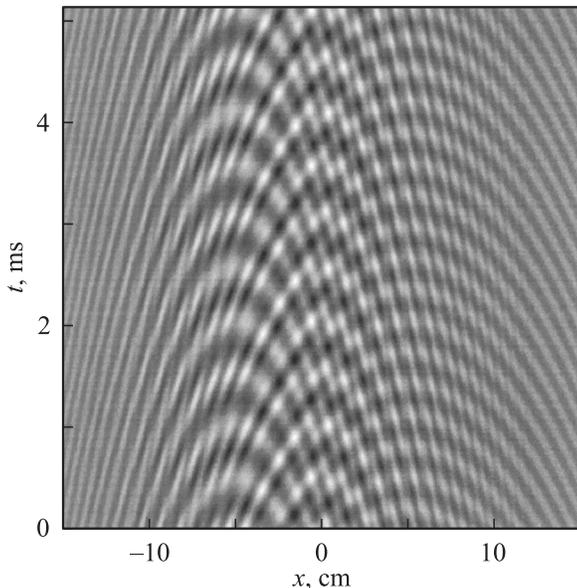


Рис. 2. Пространственно-временное распределение сигнала в случае трех точечных рассеивателей.

$E(\mathbf{r}_0, t)$  из выражения (3) для трех точечных рассеивателей в воздухе (два рассеивателя расположены на расстоянии 30 см, и один — на расстоянии 50 см). Моделирование проводилось для случая  $f_0 = 94$  GHz,  $\alpha = 6 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-2}$ , для времени измерения 5.1 ms.

В выражении (3) функция  $E(\mathbf{r}_0, t)$  соответствует данным многопозиционных измерений, используя которые необходимо обратить интеграл (3) и получить функцию распределения неоднородностей  $\rho(\mathbf{r}_S)$ .

## Метод восстановления распределения неоднородностей в воздухе

Для восстановления трехмерного изображения рассеивающих неоднородностей предлагается осуществить двухэтапную обработку радиолокационного сигнала (3). На первом этапе происходит преобразование Фурье по времени от (3) для получения разрешения по дальности (временная фокусировка), а на втором этапе производится пространственно согласованная фильтрация для получения разрешения в плоскости сканирования (пространственная фокусировка).

Если произвести преобразование Фурье по времени к (2), т.е. перейти в частотную область, то можно записать для случая точечного рассеивателя:

$$V(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_S, \omega) = B \tilde{\delta}(\omega - 2\alpha\Delta t) \exp[-i(\omega_0\Delta t - \alpha\Delta t^2)], \quad (4)$$

где

$$\tilde{\delta}(\omega) = \frac{2 \sin\left(\frac{T}{2}(\omega - 2\alpha\Delta t)\right)}{\omega - 2\alpha\Delta t} \exp\left[i \frac{T}{2}(\omega - 2\alpha\Delta t)\right];$$

$T = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{2\alpha}$  — время проведения измерений;  $\omega_{\max}$  — максимальная частота сигнала.

Из выражения (4) следует, что на частоте

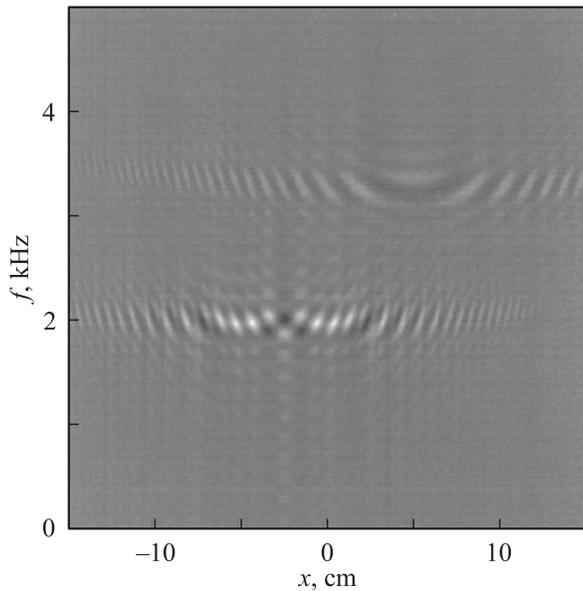
$$\omega = 2\alpha\Delta t = \alpha \frac{4}{c} |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_S| \quad (5)$$

функция  $V(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_S, \omega)$  будет иметь максимум, следовательно, по положению максимума можно точно определить время возвращения рассеянного сигнала  $\Delta t$ . Кроме того, высокая локализация  $V(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_S, \omega)$  вблизи частоты  $\omega = 2\alpha\Delta t$  позволяет получить разрешение по дальности, поскольку задержке  $\Delta t$  линейно соответствует определенное расстояние от зондирующей системы до рассеивателя.

Для случая произвольного распределения неоднородностей обозначим преобразование Фурье по времени от измеренного сигнала как  $\tilde{E}$ :

$$\tilde{E}(\mathbf{r}_0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\mathbf{r}_0, t) \exp(i\omega t) dt. \quad (6)$$

На рис. 3 представлена действительная часть результата численного моделирования функции  $\tilde{E}(\mathbf{r}_0, \omega)$  из (6)



**Рис. 3.** Действительная часть преобразования Фурье по времени от принятого сигнала.

для трех точечных рассеивателей. Оси частот можно привести в соответствие дальность до рассеивателя, используя формулу (5). Можно видеть, что по оси частот отклик на точечный рассеиватель локализован, как и предполагалось в (4). Причем степень локализации определяется полосой частот ЛЧМ-сигнала. При расширении полосы частот разрешение по дальности будет улучшаться. Исходя из выражения (4) разрешение по дальности можно записать в следующем виде:

$$\Delta z = \frac{\pi c}{\omega_{\max} - \omega_0}.$$

Таким образом, благодаря преобразованию Фурье по времени достигнуто разрешение по дальности.

Однако на этом этапе не получено приемлемое разрешение в плоскости сканирования. Для получения разрешения в плоскости сканирования предлагается произвести операцию пространственной согласованной фильтрации для каждой из частот функции  $\tilde{E}(\mathbf{r}_0, \omega)$ .

Сформируем передаточные функции согласованных фильтров для каждой частоты в виде реакции системы на точечный рассеиватель, расположенный в точке  $(x_S = 0, y_S = 0, z_S)$ . Выразим дальность положения рассеивателя  $z_S$  через частоту, при этом будем считать, что  $x_0 = 0, y_0 = 0$  (координаты рассеивателя совпадают с положением антенны в плоскости сканирования). Тогда можно записать:

$$\omega = 2\alpha\Delta t = \frac{4\alpha}{c} \sqrt{z_S^2}, \quad \text{или} \quad z_S = \frac{\Delta t c}{2} = \frac{\omega c}{4\alpha}.$$

Исходя из выражения (4) сформируем передаточную функцию пространственно согласованного фильтра в виде:

$$H(x, y, \omega) = \exp(i[\omega_0\Delta t' - \alpha\Delta t'^2]), \quad (7)$$

где

$$\Delta t' = \frac{2}{c} \sqrt{x^2 + y^2 + \left(\frac{\omega c}{4\alpha}\right)^2}.$$

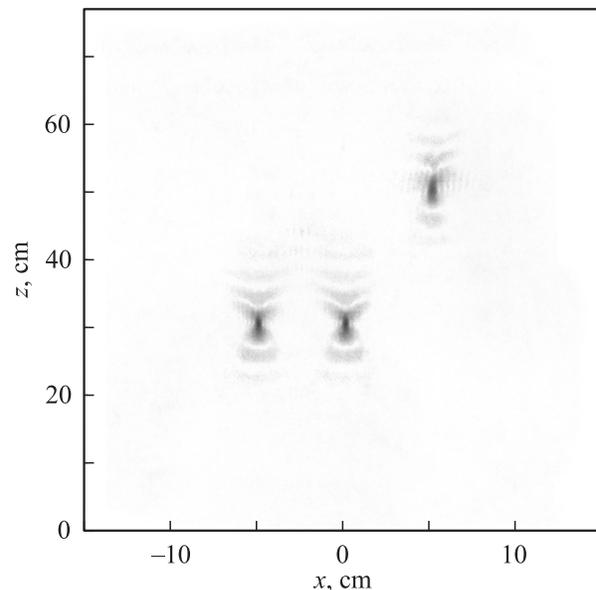
По виду пространственно согласованного фильтра можно сделать вывод, что разрешение системы будет ухудшаться при увеличении дальности, что не противоречит общей теории радара с синтезированной апертурой.

Пространственно согласованная фильтрация с применением фильтра (7) осуществляется с помощью интеграла свертки по пространственным координатам:

$$\rho(x_S, y_S, z_S) \approx \int_y \int_x \tilde{E}(x, y, \omega) H(x_S - x, y_S - y, \omega) dx dy. \quad (8)$$

В данном случае пространственное разрешение определяется максимальной частотой в спектре ЛЧМ-сигнала. Таким образом, операция (8) позволяет получить функцию трехмерного распределения неоднородностей в среде. Данный метод (включая операцию свертки в (8)) алгоритмически реализуется на основе быстрого преобразования Фурье.

На рис. 4 представлен результат восстановления распределения неоднородностей по формуле (8) на основе данных численного моделирования, изображенных на рис. 2. Можно отчетливо различить изображения трех точечных рассеивателей. Разрешение по дальности определяется шириной полосы частот, а разрешение в плоскости сканирования — максимальной частотой в спектре сигнала. Видно, что разрешение в плоскости перемещения антенн лучше, чем по дальности. Это связано с тем, что центральная частота ЛЧМ-сигнала составляет 94 GHz, благодаря чему обеспечивается высокое разрешение в плоскости перемещения антенн.



**Рис. 4.** Результат восстановления распределения неоднородностей в воздухе (численная модель).

В то же время полоса частот используемого ЛЧМ-сигнала приблизительно составляет 5 GHz, что обеспечивает более низкое разрешение по дальности, чем в плоскости перемещения антенн.

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают работоспособность предложенного метода восстановления трехмерного распределения неоднородностей в воздухе по результатам многопозиционного радиозондирования с применением ЛЧМ-сигнала.

## Метод восстановления распределения неоднородностей под плоской границей раздела сред

В случае если исследуемый объект находится в некоторой однородной среде, а зондирующая радиолокационная система находится вне этой среды, возникает необходимость учитывать преломление волн при прохождении границы раздела сред. Для простоты рассмотрим плоскую границу раздела сред (рис. 5).

Метод получения трехмерного распределения неоднородностей в этом случае также состоит из двух этапов: преобразование Фурье по времени и пространственно согласованная фильтрация. Но в данном случае вид согласованного фильтра будет изменен с учетом преломления радиоволн на границе раздела сред. Для получения функции согласованного фильтра достаточно в формуле (7) заменить величину  $\Delta t'$  на численно рассчитываемое время прохождения волны по преломленной траектории.

На рис. 6 представлен результат численного моделирования восстановления распределения неоднородностей для случая радиозондирования через плоскую границу раздела сред. В численной модели три точечных рассеивателя размещались согласно рис. 5: один рассеиватель в воздухе и два рассеивателя в среде с показателем преломления 2. Здесь ось частот не заменена пространственной дальностью, поскольку из-за преломления нет простой линейной связи между частотой и дальностью, как в (5). Но тем не менее возможно

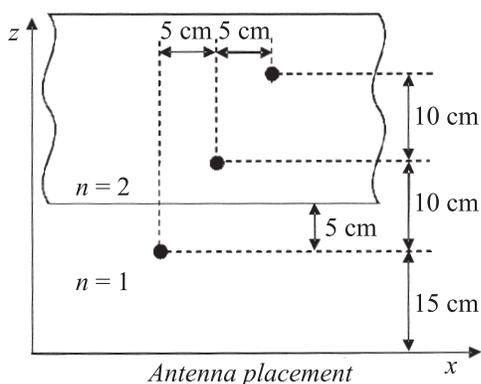


Рис. 5. Расположение точечных рассеивателей в численном эксперименте.

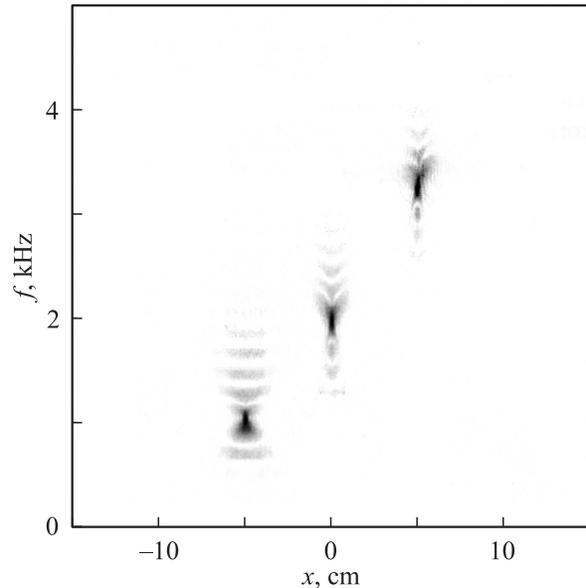


Рис. 6. Результат восстановления распределения неоднородностей в среде (численная модель).

установить однозначное соответствие между частотой и дальностью в виде ломаной кривой из двух линейных участков.

## Экспериментальные исследования

Помимо численного моделирования предложенный метод был проверен на экспериментальных данных. Экспериментальные исследования по многопозиционному радиозондированию ЛЧМ-сигналами в миллиметровом диапазоне (92–98 GHz) проводились сотрудниками Франгоферовского института неразрушающих методов контроля качества IZEP (Саарбрюккен, Германия). Результаты измерений были любезно предоставлены кафедре радиофизики Томского государственного университета для обработки.

После применения метода обработки (8) к данным измерений были получены изображения, приведенные на рис. 7, 8. На рис. 7 представлен результат восстановления пространственно-частотного изображения трех металлических стержней, расположенных на расстоянии 5 cm друг от друга по горизонтали, на удалении 30 и 50 cm от линии перемещения антенны. Было получено полное соответствие результатов натурального эксперимента и результатов численного эксперимента (рис. 4).

Также были проведены эксперименты по ЛЧМ-радиозондированию револьвера и керамического ножа (рис. 8). В данных экспериментах приемопередающая антенна перемещалась в вертикальной плоскости по декартовой сетке шагом 1.5 mm. После обработки данных ЛЧМ-радиозондирования, согласно формуле (8), были получены трехмерные изображения рассеивающих неоднородностей.

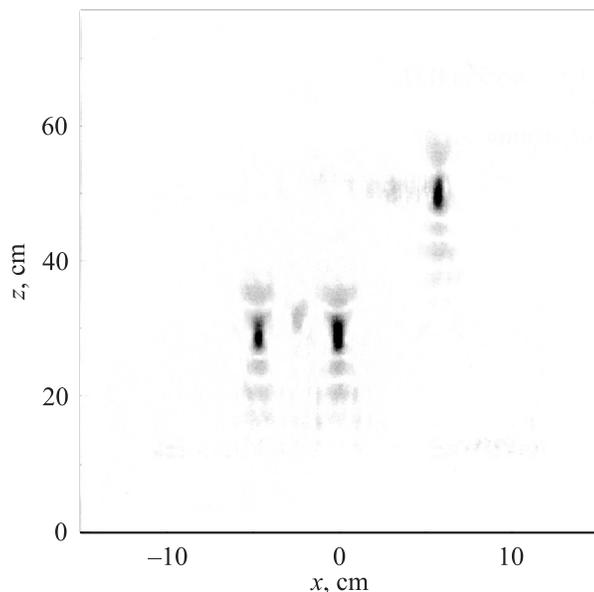


Рис. 7. Радиоизображение трех металлических стержней.

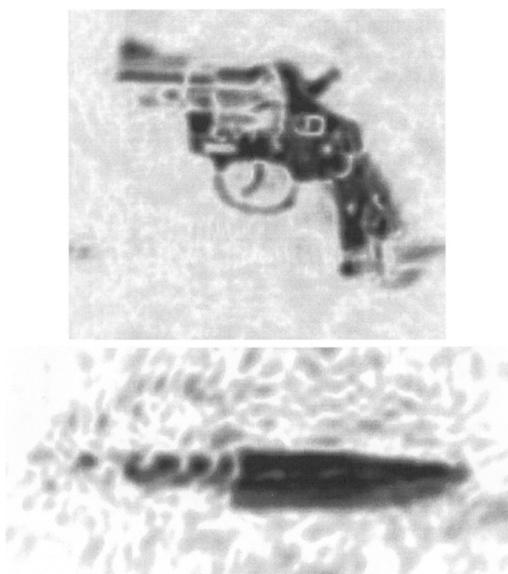


Рис. 8. Радиоизображение пистолета и керамического ножа.

На рис. 8 представлены сечения в плоскости сканирования полученных трехмерных изображений диэлектрического револьвера и керамического ножа, скрытых под одеждой. Обработка данных заняла около 30 с на персональном компьютере. Из восстановленных изображений можно видеть, что достигнуто разрешение объектов порядка 3 мм.

## Заключение

Разработан метод восстановления трехмерных изображений рассеивающих объектов на основе данных радиозондирования сигналами с линейной частотной модуля-

цией. Полученное пространственное разрешение в плоскости, параллельной плоскости сканирования, близко к теоретическому пределу для радаров с синтезированной апертурой. Разрешение по дальности тем лучше, чем шире полоса ЛЧМ-сигнала. Предложенный метод проверен результатами численного моделирования и результатами натуральных экспериментов.

Результатами экспериментальных исследований подтверждена возможность визуализации скрытых под одеждой диэлектрических объектов. Предложенный метод реализован на основе быстрого преобразования Фурье и позволяет обрабатывать данные в реальном масштабе времени.

## Список литературы

- [1] Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. // Изв. вузов. Физика. 2008. № 10. С. 63–79.
- [2] Якубов В.П., Суханов Д.Я. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 1. № 4. С. 329–338.
- [3] Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / Пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
- [4] Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. // Радиотехника. 2008. № 8. С. 35–42.
- [5] Grozov V.P., Kotovich G.V. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2003. Vol. 65. P. 409–416.
- [6] Суханов Д.Я., Якубов В.П. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 64–68.