

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ С ИЗВЕСТНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Гайкович К.П., Жилин А.В.

Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ),

Б. Печерская, 25, Нижний Новгород, 603600, Россия,

телефон : (8312) 366751, факс : (8312) 369902,

e-mail : gai@nirfi.nnov.su

*Аннотация* - Разработан метод восстановления двумерного распределения яркостной температуры по измеренному распределению антенной температуры, основанный на теории некорректных задач А.Н.Тихонова. Эффективность метода исследована путем численного моделирования. Приводятся результаты его применения к данным измерений радиотеплового излучения.

## I. Введение

Актуальной проблемой измерений теплового излучения в радиоастрономии и в задачах дистанционного зондирования естественных сред является определение истинного распределения яркостной температуры по измеренному распределению антенной температуры, которое представляет собой двумерную свертку истинного распределения радиояркостности с диаграммой направленности антенной системы. При этом происходит заглаживание (замывание) реальной картины теплового излучения. Если известна форма диаграммы направленности (обычно имеется возможность измерить ее с довольно высокой точностью), то можно сформулировать обратную задачу восстановления радиояркостности по данным измерений за порогом дифракционного предела разрешения.

Эта задача сводится к решению некорректного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа двумерной свертки, которое, как известно, является некорректным, то есть неустойчивым к сколь угодно малым погрешностям измерений. Для решения этого уравнения необходимо привлекать дополнительную (априорную) информацию о точном решении. Специфика этой информации и определяет различные методы регуляризации. Известны подходы к решению сформулированной задачи, основанные на статистических свойствах точного решения (оптимальная фильтрация по Винеру), на сглаживании, на выборе сетки дискретизации [1-2]. Во многих работах рассматривалась более простая одномерная задача. В данной работе рассматриваются возможности применения метода обобщенной невязки А.Н.Тихонова [1], где используется весьма общая информация о квадратичной суммируемости искомой функции и ее производной.

## II. Исходные соотношения

Если задано двумерное распределение яркостной температуры в пространстве, то при сканировании этого распределения антенной с заданной формой диаграммы направленности, мы получаем двумерное распределение антенной температуры. Ставится задача восстановления распределения радиояркостности по распределению антенной температуры, если известна форма

диаграммы направленности. Связь между антенной и яркостной температурами в общем виде представляется в виде двумерной свертки

$$T_a(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-s, y-t) T_{\text{я}}(s, t) ds dt \quad (1)$$

где ядро  $K(w, W)$  - диаграмма направленности антенны,  $T_a(x, y)$  - антенная температура,  $T_{\text{я}}(s, t)$  - яркостная температура (искомое распределение). Это интегральное уравнение представляет собой уравнение Фредгольма первого рода типа двумерной свертки. Разрешение его относительно  $T_{\text{я}}(s, t)$  позволяет восстановить распределение яркостной температуры.

Уравнение (1) решалось методом Тихонова [1]. Известно, что точность восстановления в некорректных задачах может быть определена только из результатов численного моделирования.

## III. Результаты численного моделирования

Для демонстрации возможностей метода численное моделирование производилось при двух значениях ошибки измерений в каждом случае. В численном эксперименте рассматривались распределения двух типов. Первое - равномерное распределение, но с резкими границами - моделировалось словом ART с постоянным значением яркостной температуры внутри слова и нулевым значением - во внешней области. Другое - двугорбое распределение с плавным изменением антенной температуры - задавалось суммой двух двумерных гауссовых распределений. В результате моделирования измерений в заданной двумерной области с широкой двумерной гауссовой диаграммой направленности в полученных распределениях антенной температуры тонкая структура исходных распределений оказалась совершенно замазанной.

Разработанный метод позволил восстановить исходные распределения. При этом при точности измерения антенной температуры порядка 1% (характерной для большинства абсолютных измерений) точность восстановления составила около 20% от величины характерных неоднородностей радиояркостности, а эффективная разрешающая способность увеличилась в три - четыре раза. Исследована также сходимост

решения при стремлении моделируемого уровня погрешности к нулю (моделируемая ошибка 0,01 %).

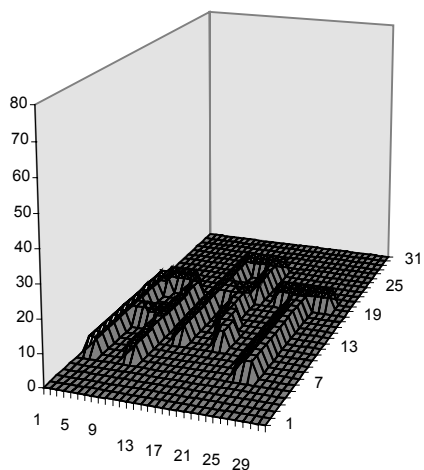


Рис.1. Исходное (моделируемое) распределение яркостной температуры.

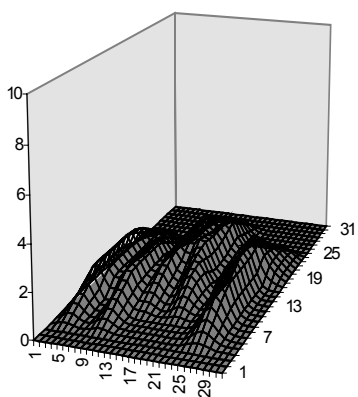


Рис. 2. Распределение антенной температуры, соответствующее рис.1.

На рис.1-2 представлены двумерные распределения исходного радиотеплового поля и результатов его измерения антенной системой с несимметричной двумерной гауссовой формой диаграммы направленности, при которой исходное изображение слова становится совершенно неразличимым.

При восстановлении параметром метода Тихонова является оценка интегральной погрешности измерений, которой в методе обобщенной невязке ставится в соответствие величина параметра регуляризации, определяющего степень сглаженности решения. При стремлении ошибки к нулю параметр регуляризации также стремиться к нулю, но более медленно. Решение при стремлении ошибки к нулю в интегральной метрике сходится к точному равномерно, что составляет существенное преимущество метода Тихонова, позволяя оценивать погрешность восстановления по максимуму модуля для моделируемых распределений, которые в данной физической задаче могут рассматриваться как типичные или как экстремальные в зависимости от ориентации задачи на гарантированное отсутствие в решении ложных особенностей или, наоборот, на обнаружение тонких деталей.

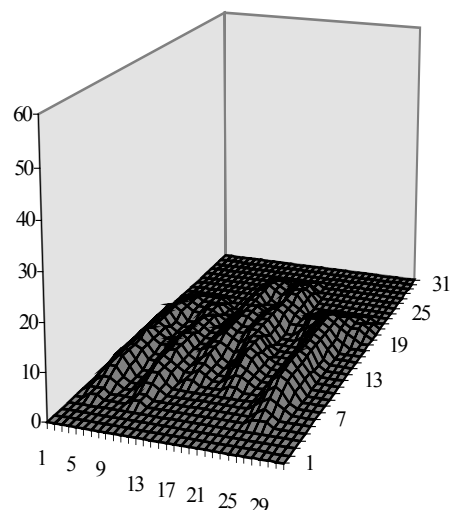


Рис. 3. Восстановленное распределение яркостной температуры при точности измерений 1 %.

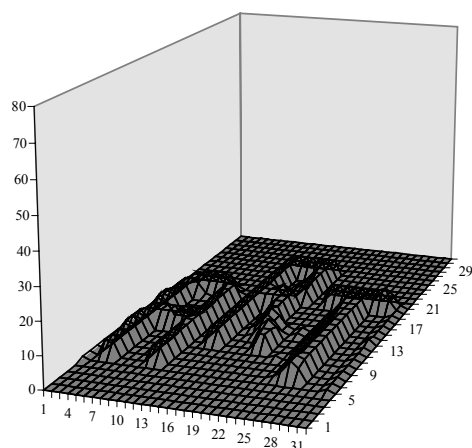


Рис. 4. Восстановленное распределение яркостной температуры при точности измерений 0,01 %.

Представленные на рис. 3-4 результаты восстановления позволяют сделать вывод, что метод достаточно эффективен для решения поставленной задачи для распределений с резкими границами. При умеренной точности решение еще несколько заглаживает истинную картину, но при уменьшении погрешности восстановление становится безупречным.

Следует отметить, что точность восстановления в некорректных задачах рассматриваемого типа возрастает не пропорционально уменьшению ошибки, а значительно медленнее. Кроме того, она зависит также от специфики самого восстанавливаемого распределения (например, если характерные детали распределения много шире луча диаграммы направленности, то антенная температура будет просто равна яркостной). Эта особенность весьма затрудняет и введение понятия разрешающей способности, которая также должна зависеть не только от формы диаграммы направленности и погрешности измерений, но и от

специфики самого восстанавливаемого распределения.

Для качественного понимания увеличения разрешающей способности в численном моделировании рассмотрен случай восстановления плавного распределения с двумя острыми близкорасположенными пиками.

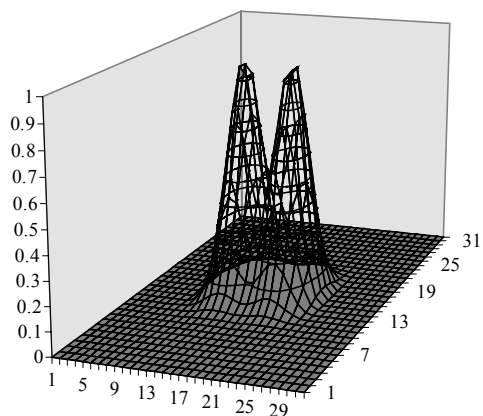


Рис. 5 Исходное (моделируемое) распределение яркостной температуры.

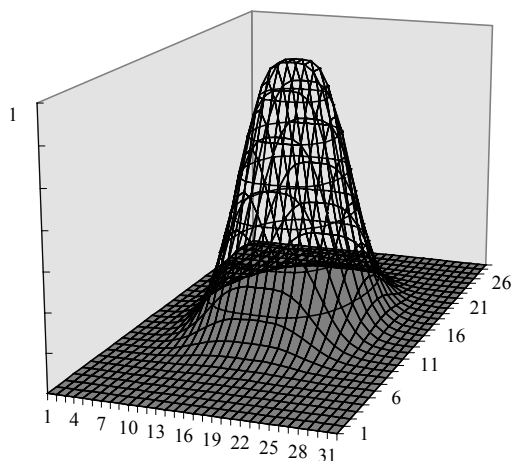


Рис. 6. Распределение антенной температуры, соответствующее рис.5.

Можно видеть, что широкая гауссовая диаграмма направленности, использованная при моделировании, полностью загладила исходное двугорбое распределение, и оно выглядит как одногорбое. Тем не менее, алгоритм восстановления позволяет разрешить двугорбую структуру исходного распределения радиояркостной температуры уже при умеренных точностях измерений (см. рис.7). Можно видеть, что при данном уровне погрешности в решении возникают незначительные несуществующие особенности в виде разбегающихся волн. По мере роста точности восстановления (см. рис.8) решение, как и в первом случае, сходится к исходному распределению и при точности 0,01% уже не содержит ложных деталей. Способность метода восстановления к разрешению скрытых в наблюдаемом распределении деталей и характеризует разрешающую способность метода. Рост разрешающей способности можно приблизительно оценить отношением наименьших деталей в восстановленном распределении к ширине

диаграммы направленности. В рассматриваемом случае при ошибке 1% разрешающая способность возрастает в 3-4 раза. Разумеется, в конкретной физической задаче необходимо проводить аналогичное моделирование с учетом ее специфики.

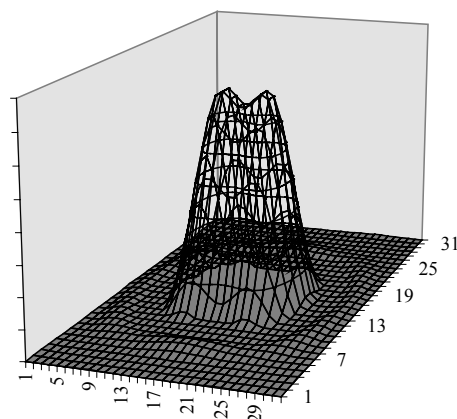


Рис. 7. Восстановленное распределение яркостной температуры при точности измерений 1 %.

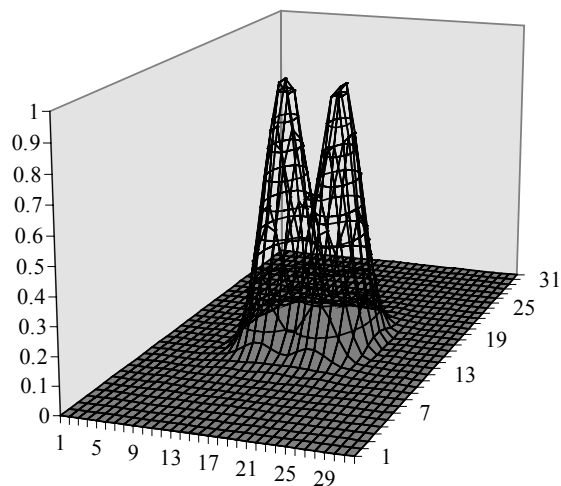


Рис. 8. Восстановленное распределение яркостной температуры при точности измерений 0,01 %.

#### IV. Применение метода для реальных задач

Метод применяется для восстановления двумерного распределения радиояркости подстилающей поверхности по данным вертолетных радиометрических измерений [3] с высоты 50 м в надири на длине волны 3 см с шириной диаграммы направленности  $20^\circ$ , в ходе которых методом параллельных разрезов измерялось двумерное распределение восходящего теплового излучения выбранного участка поверхности размером  $150 \times 250$  м (озеро с нефтяными загрязнениями, берег). Неоднородность излучательной способности поверхности создавала большие контрасты радиояркости (более 100 К). В данном эксперименте было затруднительно добиться повышения разрешающей способности измерений путем уменьшения высоты над поверхностью, поскольку эта на меньших высотах поток воздуха от пропеллера вертолета начинал разгонять нефтяную пленку на озере, а основной целью эксперимента и

было измерение теплового излучения нефтяной пленки. Увеличение размеров рупора, которое также могло бы увеличить разрешающую способность, было невозможно из-за условий компоновки аппаратуры на борту вертолета. Таким образом, использование описываемого в данной работе метода восстановления является в этом случае единственным способом достижения необходимой разрешающей способности.

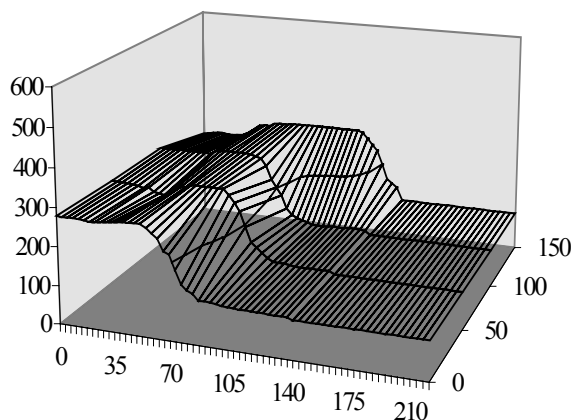


Рис. 9. Измеренное распределение антенной температуры участка земной поверхности на длине волны 3 см.

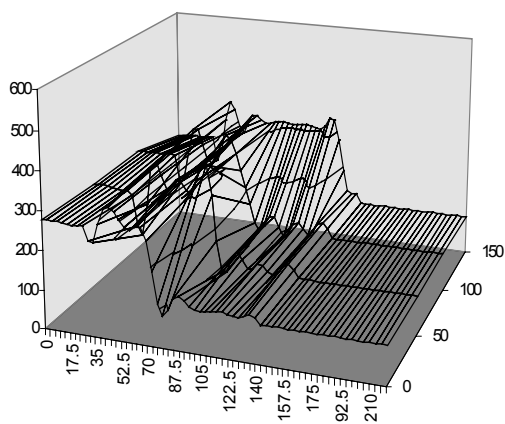


Рис. 10. Восстановление по данным рис.9 распределения яркостной температуры при ошибке радиометрических измерений 1 %.

Можно видеть, что результаты восстановления позволили обнаружить более тонкую структуру распределения радиояркости, чем она отображалась в измеренных распределениях антенной температуры. Приведенные выше результаты численных экспериментов для уровня точности 1% позволяют судить о качестве полученного распределения и степени достоверности его деталей.

## V. Заключение

Результаты работы показали высокую эффективность алгоритмов восстановления распределения радиояркости, основанных на применении метода обобщенной невязки Тихонова для двумерных уравнений типа свертки [3]. Выполнено численное моделирование как при реализуемом уровне точности измерений, так и при экстремально высоком, где показана сходимости решения к точному. Метод был применен к реальным измерениям в практической задаче, где не было другой возможности для повышения разрешающей способности.

Можно надеяться, что данный метод может быть использован не только в рассмотренном круге задач, но и в других случаях, где проблемой является ограничение разрешающей способности прибора дифракционными эффектами и где задача сводится к интегральному уравнению Фредгольма первого рода типа свертки. Задачей теории является формулировка понятия разрешающей способности с учетом возможностей конкретного метода восстановления за пределом дифракционного порога.

Исследования выполнены при поддержке Минобразования России, грант N 95-0-8.1-71.

## IV. Список литературы

- [1]. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М: Наука, 1983, 200 с.
- [2]. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
- [3]. Гайкович К.П., Снопик Л.М., Троицкий А.В. \\\\ Вертолетные радиометрические измерения тонкого озерного льда и нефтяной пленки на озерах и грунте. Изв.вузов. Радиофизика. 1995, т.38, N 11, с.1105-1117.

## RETRIEVAL OF TWO-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF RADIOBRIGHTNESS BY MEASUREMENTS DATA WITH KNOWN ANTENNA BEAM PATTERN

Gaikovich K.P., Zhilin A.V..  
*Radiophysical Research Institute,  
 B. Pecherskaja St., 25, Nizhny Novgorod, 603600,  
 Russia.,  
 phone : (8312) 366751, fax : (8312) 369902,  
 e-mail : gai@nirfi.nnov.su*

The method of two-dimensional radiobrightness distribution retrieval by measured antenna temperature distribution based on Tikhonov's theory of oncorrect problems has been worked out. The efficiency of this method has been investigated in numerical simulation. Its application results to thermal radioemission measurements data are presented.