

## Малоракурсная томографическая реконструкция для задач космической радиолокации

М.И. Агафонов, О.И. Шарова

ФГНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт»  
603950, г.Нижний Новгород, ул.Б.Печерская, д.25/12а  
agfn@nirfi.sci-nnov.ru

*Представлены результаты исследований реконструкции трехмерных томографических изображений непосредственно по одномерным профилям без построения на промежуточном этапе двумерных сечений (вариант 3D1D). Использован радиоастрономический подход (РП) – метод, разработанный для решения задач малоракурсной томографии. Разработанная процедура позволяет при вращении объекта и наличии одного фиксированного угла его наклона получать качество 3D реконструкции, аналогичное построению трехмерного массива на основе набора двумерных сечений, полученных методом ОФП. Реконструкция 3D1D на основе РП перспективна для построения высокоинформативных 3D изображений в задачах космической радиолокации.*

*The investigations results of the 3D tomographical images reconstruction on the base of 1D profiles are presented without the calculation on the intermediate stage of the 2D slices (version 3D1D). There was applied the radioastronomical approach (RA) – method created for the solution of the problems of few projections tomography. By the rotating of the object and the presence of only one fixed angle of its inclination, the introduced procedure allows to achieve the quality of the reconstruction similar to the calculation of the 3D structure on the base of the set of 2D slices obtained with the FBP method. The 3D1D reconstruction with RA method is prospective for the calculation of the high informative 3D images by the solution of the space radiolocation problems.*

### Введение

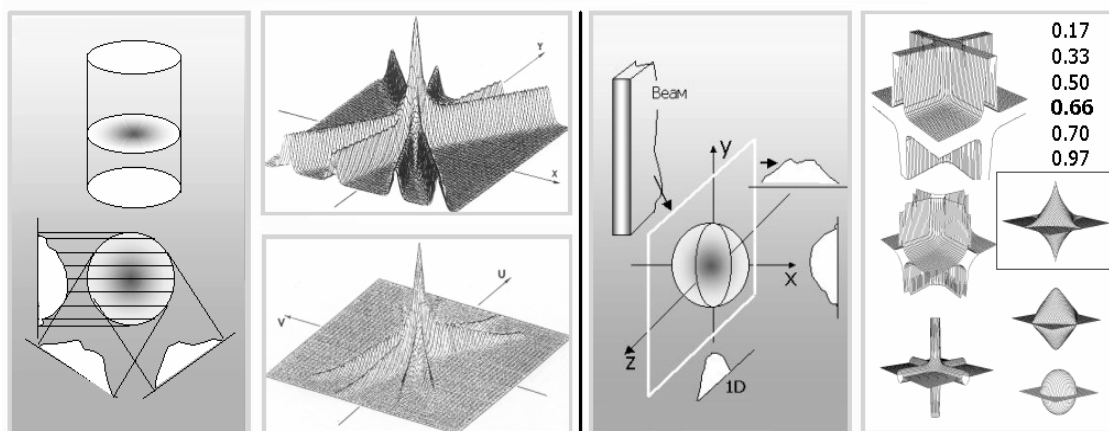
Развитие физики и техники космической радиолокации, в том числе с применением сверхширокополосного электромагнитного излучения, а также компьютерных технологий делает особенно актуальной разработку эффективных методов построения высокоинформативных изображений. Особый интерес приобретают методы реконструкции изображений с использованием ракурсных проекций [1]. Интерес к томографическим методам существенно повысился при решении локационных задач в последние годы [2].

Методы реконструкции, основанные на фильтрации, наиболее известным из которых является широко использующийся в медицинской томографии [3] метод суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП), неэффективны при ограничениях количества ракурсов и их неравномерном распределении в пространстве. Более привлекательными в этом случае являются методы, обладающие нелинейными свойствами [4] – метод максимальной энтропии (МЭ) и итерационные алгоритмы с нелинейными ограничениями (ОАНО). Метод МЭ использует статистический подход и наиболее эффективен в случае обработки больших массивов данных. При ограничениях числа ракурсов и диапазона угла их расположения более привлекательны ИАНО. Наши работы [5-7] посвящены разработке и развитию реконструкции двумерных и трехмерных томографических изображений на основе подхода, в котором использованы алгоритмы чистки, являющиеся радиоастрономическими реализациями ИАНО. В [8] обсуждались некоторые возможности приложения разработанного радиоастрономического подхода (РП) для получения локационных изображений. Было показано, что РП позволяет в несколько раз сократить необходимое число проекций по сравнению с методом ОФП, существенно повысить динамический диапазон, а также

использовать неравномерное распределений ракурсов в пространстве. Разработанный вариант метода 3D1D дает возможность выполнять трехмерную (3D) реконструкцию непосредственно по одномерным (1D) профилям без построения на промежуточном этапе двумерных сечений. В настоящей работе представлены результаты исследования 3D реконструкции по 1D профилям на основе РП. Показано, что при вращении объекта и при наличии лишь одного стационарного угла наклона объекта, равного 45 градусам, можно получить качество 3D реконструкции, сравнимое с результатом обычной томографической реконструкции с использованием предварительного вычисления набора двумерных сечений методом ОФП. Процедура перспективна для решения задач космической радиолокации – для построения высокоинформативных изображений космического мусора, астероидов и т.д.

### 1 Радиоастрономический подход к реконструкции в малоракурсной томографии (трехмерный вариант 3D1D)

В работах [5-7] разработан и получил развитие радиоастрономический подход к решению задач малоракурсной томографии. Его основные отличительные признаки: решение задачи деконволюции в пространстве изображений (двумерном или трехмерном, в зависимости от характера задачи), введение суммарного изображения и эквивалентной суммарной передаточной функции (СПФ) с последующей минимизацией откликов от боковых лепестков этой функции при помощи итерационных алгоритмов чистки.



**Рис. 1. Геометрия двумерной (2D1D) и трехмерной (3D1D) томографических задач при регистрации одномерных проекций. Приведены примеры соответствующих суммарных передаточных функций. Слева – для двумерной задачи при четырех ракурсах. Справа – для трехмерного варианта при трех ракурсах, расположенных в соответствии с направлениями главных осей**

Примеры СПФ для двумерной и для трехмерной задач представлены на рис.1. В первом случае построение СПФ выполнено на основе четырех элементарных профилей передаточных функций, во втором – на базе трех передаточных функций, расположенных в соответствии с направлениями главных осей. Рисунки поясняют процедуру проецирования. Фигура в виде цилиндра иллюстрирует процесс накопления данных для получения трехмерного числового массива на основе вычисления параллельных двумерных сечений, как это делается в медицинской томографии при линейном перемещении стола с пациентом [3]. Изображение СПФ для двумерной задачи приведено также и в области пространственных частот. Как видно из рисунка, СПФ имеет большие области в пределах установленной граничной частоты  $\omega_r$ , где ее

отклик равняется нулю. Решение задачи методом РП минимизирует отклики от боковых лепестков СПФ.

Пример СПФ для трехмерной задачи на основе трех ножевых диаграмм (трех элементарных передаточных функций) показан в правой части рис.1. СПФ представлена в этом случае с помощью семейства изоповерхностей, уровни интенсивности которых приведены в правом верхнем углу рисунка. Значение максимальной интенсивности нормировано на единицу. Изоповерхность, соответствующая максимальному уровню боковых лепестков, равному 0.66 при трех ножевых диаграммах, выделена рамкой. Горизонтальные плоскости изоповерхностей при уровнях 0.5, 0.66, 0.7, 0.97 являются лишь служебными, для уровней 0.17 и 0.33 они соответствуют реальным элементам фигур.



**Рис. 2. Получение проекций при зондировании вращающегося объекта при фиксированном угле наклонения**

Проблема трехмерной реконструкции осложняется для целого ряда томографических задач, в которых 3D изображение может рассчитываться лишь на основе 1D профилей, полученных при вращении объекта на ракурсах, расположенных лишь на поверхности конуса – см. геометрию на рис.2. Раскрыв конуса зависит от угла наклонения объекта ( $i$ ). Построение двумерных сечений в этом случае на промежуточном этапе невозможно. Зона расположения ракурсов ограничена из-за фиксированного угла наклонения системы. Требуется эффективный метод решения трехмерной задачи малоракурсной томографии. Реконструкция на основе РП предусматривает в этом случае вычисление соответствующей трехмерной СПФ на базе отдельных элементарных передаточных функций (ножевых диаграмм, ширина которых в локационном случае определяется временным разрешением сигнала), а также трехмерного суммарного изображения с использованием обратного проецирования, что позволяет перейти далее к решению уравнения свертки, которое для трехмерного варианта имеет вид

$$g(x, y, z) = f(x, y, z) *** h(x, y, z) + n(x, y, z), \quad (1)$$

где  $g(x, y, z)$  – суммарное изображение, которое вычисляется на основе имеющихся профилей,  $h(x, y, z)$  – суммарная передаточная функция (СПФ),  $f(x, y, z)$  – искомое распределение яркости,  $n(x, y, z)$  – случайный шум. Суммарное изображение и СПФ вычисляются на основе обратного проецирования с учетом как угла наклонения системы  $i$ , так и совокупности всех углов, соответствующих ракурсам наблюдения при вращении объекта.

## **2 Оценка возможных артефактов томограммы на основе анализа уровней боковых лепестков СПФ**

Отклики от боковых лепестков являются причиной искажений. Оценка качества получаемых томограмм можно выполнить на основе анализа СПФ, принимая во

внимание значения максимальных уровней их боковых лепестков. Величины уровней зависят в первую очередь от числа ракурсов. Исходя из геометрии задачи, можно оценить их необходимое количество. Томограмме без артефактов с бесконечно высоким разрешением соответствует идеальная СПФ, которая в 3D пространстве имеет вид дельта-функции, то есть, точечного сенсора, сканирующего объект. Однако в реальных, даже в наиболее благоприятных условиях СПФ на уровне половины интенсивности (НРВW) имеет вид сферы, конечные размеры которой определяют разрешение томограммы, см. рис.3(а).

Анализируя геометрию СПФ на рис.1, можно заключить, что разрешение и максимальный уровень боковых лепестков СПФ обусловлены в первую очередь числом ракурсов, однако для минимизации этого уровня при варианте 3D1D необходимо также выполнение дополнительного условия, определяющего принцип их расположения в пространстве (подробнее об *условии непересечения* см. в [6]). Проведенное исследование показало, что РП является эффективным методом реконструкции для варианта 3D1D и позволяет при  $i=45^\circ$  получить качество восстановления, сравнимое со стандартной процедурой ОФП на основе набора двумерных сечений. Необходимое число ракурсов можно оценить для конкретной задачи. Наличие шума требует дополнительного анализа.

### 3 Влияние угла наклона системы на результат томографической реконструкции для варианта 3D1D

Анализ изоповерхностей СПФ на уровне половины интенсивности (НРВW) позволяет оценить разрешение получаемых томограмм как в плоскости  $(x, y)$ , так и в направлении вертикальной оси  $z$ . Одинаковое разрешение томограммы в направлении каждой из трех главных осей может быть реализовано лишь при использовании угла наклона  $i=45^\circ$ . Его изменение приводит к различиям разрешения по оси  $z$  в сравнении с плоскостью  $(x, y)$ , что иллюстрирует рис.3.

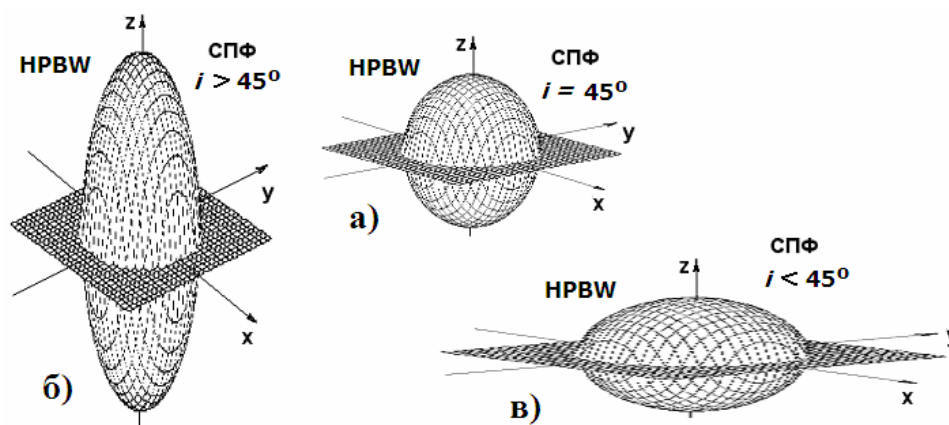


Рис. 3. Примеры изоповерхностей для СПФ на уровне половины интенсивности (НРВW) при трех вариантах углов наклона вращающихся объектов: а) сфера при  $i=45^\circ$ ; б) вытянутый эллипсоид при  $i>45^\circ$ ; в) сплюснутый эллипсоид при  $i<45^\circ$  (горизонтальная плоскость - служебный элемент построения)

#### Заключение

Разработана и исследована эффективная процедура трехмерной реконструкции по одномерным профилям (3D1D) на основе РП, которая является основой для решения широкого круга проблем. В настоящее время она экспериментально реализована в задачах трехмерной доплеровской томографии при исследованиях движений газовых

потоков в двойных звездных системах [9-10]. Пространством изображений при этом является трехмерное пространство скоростей ( $V_x, V_y, V_z$ ). В качестве 1D профилей используются профили спектральных линий, полученные при вращении объектов, привязанные к радиальным скоростям. Трехмерный вариант доплеровской томографии реализован впервые. Реконструкция 3D1D перспективна также для приложения в локационных задачах для получения высокоинформативных изображений космических объектов. Развитие методики предполагает адаптацию в эксперименте. Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку исследований (грант 09-02-00993).

### **Литература**

1. Кононов А.Ф. Применение томографических методов для получения радиолокационных изображений объектов с помощью сверхширокополосных сигналов. // Зарубежная электроника. 1991. №1. С.35-49.
2. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография. / Под ред. А.В.Соколова. – М.: Радиотехника, 2003.
3. Календер В. Компьютерная томография. Москва: Техносфера, 2006. – 344с.
4. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. –304с.
5. Агафонов М.И. Томография при ограниченном числе проекций. I.Радиоастрономический подход к проблеме и метод 2-CLEAN DSA. Известия вузов. Радиофизика. 2004, т.47, №2. с.94-110.
6. Агафонов М.И., Шарова О.И. Томография при ограниченном числе проекций. II.Радиоастрономический метод CLEAN в приложении к трехмерным задачам. Известия вузов. Радиофизика. 2005, т.48, №5. с.367-381.
7. Agafonov M.I., Sharova O.I. Few projections astrotomography: radio astronomical approach to 3D reconstruction. Astronomische Nachrichten. 2005.v.326, No.2, p.143-149.
8. Агафонов М.И., Шарова О.И. Томографическая реконструкция высокоинформативных изображений при ограниченном числе ракурсов зондирования. Труды Второй Всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006. С.313-317.
9. Agafonov M.I., Richards M.T., Sharova O.I. Three-dimensional Doppler tomography of gas flows in the algol-type binary U Coronae Borealis. Astrophysical Journal. 2006. v.652, p.1547-1553.
10. Agafonov M.I., Sharova O.I., Richards M.T. Three-dimensional Doppler Images of the Disklike and Streamlike States of U Coronae Borealis. Astrophysical Journal. 2009. v.690, p.1730-1744.