ТРЕХМЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

М. И. Агафонов, О. И. Шарова

Федеральное государственное научное учреждение
"Научно-исследовательский радиофизический институт" (ФГНУ НИРФИ)
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12а
e-mail: agfn@nirfi.sci-nnov.ru

Впервые реализован трехмерный вариант доплеровской томографии в задаче исследования движений газовых потоков в двойных звездных системах. Рассмотрена реконструкция изображений в трехмерном пространстве скоростей (V_x, V_y, V_z), которая выполняется на основе разработанного метода решения задач малоракурсной томографии, получившего название радиоастрономический подход (РП). Используются профили спектральных линий, наблюдаемые во время вращения объектов при различных орбитальных фазах. Сообщается о первых результатах, полученных для трех звездных систем, в которых информация о движении газовых потоков представлена с учетом компонента скорости V_z, перпендикулярного орбитальной плоскости.

ВВЕДЕНИЕ

Метод доплеровской томографии [1] используется с 1988 года для изучения движений газовых потоков в двойных звездных системах. Во многих случаях он позволяет получать информацию, недоступную прямым наблюдениям существующими инструментами. Основой являются профили спектральных линий, наблюдаемые во время вращения объекта при различных орбитальных фазах. Томографические изображения, построенные в пространстве скоростей, позволяют получать также ценные сведения и о структуре объектов в координатной области.

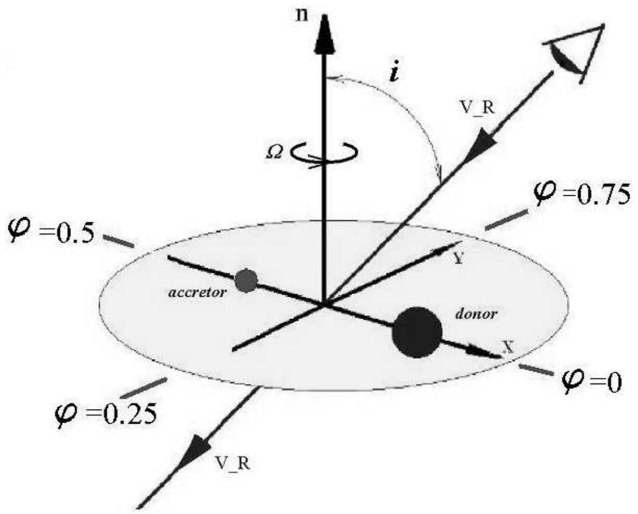
До самого последнего времени исследователями использовался лишь двумерный, так называемый, стандартный вариант доплеровской томографии, что обусловлено значительными сложностями реконструкции трехмерных томограмм. Широко применяемый для получения изображений в двумерном пространстве метод обратных фильтрованных проекций (ОФП) не позволяет получить в трехмерном варианте задачи удовлетворительный результат. Это связано с тем, что ракурсы наблюдения, получаемые за счет вращения системы, расположены радиально лишь на поверхности конуса, раскрыв которого равен углу наклонения системы. В этом случае необходимо решение задачи малоракурсной томографии. Целесообразно использование методов реконструкции, обладающих нелинейными свойствами [2].

Совершенно очевидно, что предположение, введенное в двумерный вариант доплеровской томографии об отсутствии движений потоков в направлениях, отличных от орбитальной плоскости систем, не соответствует физической природе целого ряда объектов. Поэтому реализация и развитие трехмерного (3D) варианта доплеровской томографии, включающего все три компонента скорости V_x, V_y, V_z, является в настоящее время актуальной задачей для получения новой, более полной адекватной информации о движениях газовых потоков в звездных системах.

В работе рассмотрена реализация трехмерного варианта доплеровской томографии на основе разработанного метода решения задач малоракурсной томографии, получившего название радиоастрономический подход (РП) [3, 4]. Трехмерная версия РП (3D1D) позволяет проводить реконструкцию трехмерных доплеровских томограмм с использованием одномерных профилей спектральных линий. Выполненная предварительно серия модельных расчетов подтвердила хорошие возможности реконструкции. Результаты построения томограмм по экспериментальным данным наглядно показывают, что регистрация третьего компонента скорости позволяет сделать новый шаг вперед в задаче получения адекватной информации о характере движений газовых потоков в двойных звездных системах. Реконструкция трехмерных доплеровских томограмм двойных звездных систем типа Алголь: U Северной короны (U CrB) и RS Лисички (RS Vul) [5–7] по профилям в линии H_α, а также рентгеновской двойной Лебедь X-1 (Cyg X-1) [8] на основе спектров в линии He II 4686 Å позволила впервые получить информацию о движениях газовых потоков в направлениях, отличных от орбитальной плоскости. Указано на хорошие перспективы использования трехмерного варианта доплеровской томографии для исследования двойных звездных систем.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИИ В МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Метод обратных фильтрованных проекций (ОФП) получил наибольшее распространение при построении томографических изображений в медицине, а также и в других областях. Однако при ограниченном числе проекций он не позволяет получить удовлетворительный результат. В этом случае для реконструкции целесообразно использовать методы, обладающие нелинейными свойствами. К ним относятся метод максимальной энтропии (ММЭ), а также итерационные алгоритмы с нелинейными ограничениями (ИАНО). В стандартном двумерном варианте доплеровской томографии ММЭ используется достаточно давно [1]. Однако об успешном приложении ММЭ к трехмерной реконструкции не сообщалось. Проблемы обусловлены значительными сложностями реконструкции, возникающими из-за ограничений зоны расположения ракурсов. В задаче получения профилей за счет вращения двойных систем ракурсы наблюдения располагаются лишь радиально на конусе, раскрыв которого зависит от угла наклонения системы i. Соответствующая геометрия показана на рис. 1. Требуется эффективный подход к решению трехмерной задачи малоракурсной томографии. Необходима реконструкция трехмерного числового массива томограммы непосредственно на основе одномерных профилей спектров. В работах [3, 4]



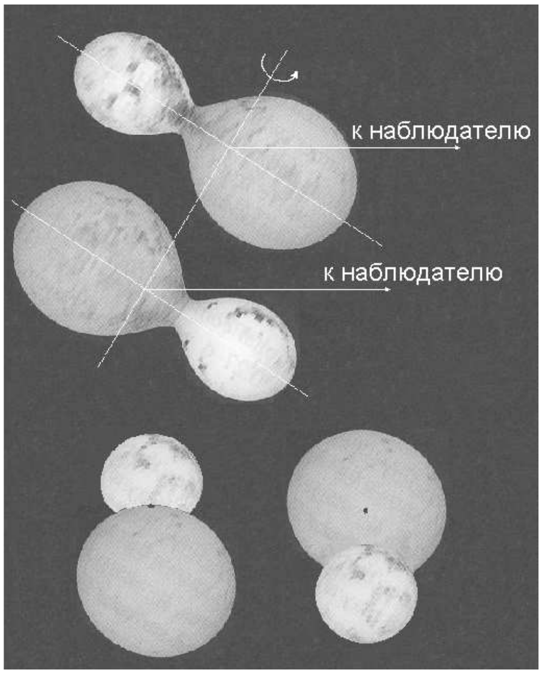


Рис. 1. Геометрия трехмерной задачи

разработан и получил развитие радиоастрономический подход (РП) к решению задач малоракурсной томографии. Его основные отличительные признаки: решение задачи деконволюции в пространстве изображений (двумерном или трехмерном в зависимости от характера задачи) с введением суммарного изображения и эквивалентной суммарной передаточной функции (СПФ) с последующим исключением откликов от боковых лепестков этой функции при помощи алгоритмов чистки. В случае доплеровской томографии пространством изображений является либо двумерное (V_x, V_y), либо трехмерное (V_x, V_y, V_z) пространство скоростей. Проблема предполагает решение уравнения свертки, которое для трехмерного варианта доплеровской томографии имеет вид

$$g(V_x, V_y, V_z) = f(V_x, V_y, V_z) * h(V_x, V_y, V_z) + n(V_x, V_y, V_z), \tag{1}$$

где $g(V_x, V_y, V_z)$ — суммарное изображение, или "грязная карта", которая вычисляется на основе имеющихся спектральных профилей, $h(V_x, V_y, V_z)$ — суммарная передаточная функция (СПФ), $f(V_x, V_y, V_z)$ — искомое распределение яркости, $n(V_x, V_y, V_z)$ — случайный шум. Суммарное изображение и СПФ вычисляются на основе обратного проецирования с учетом как угла наклонения системы i, так и совокупности углов, соответствующих орбитальным фазам наблюдения спектральных профилей.

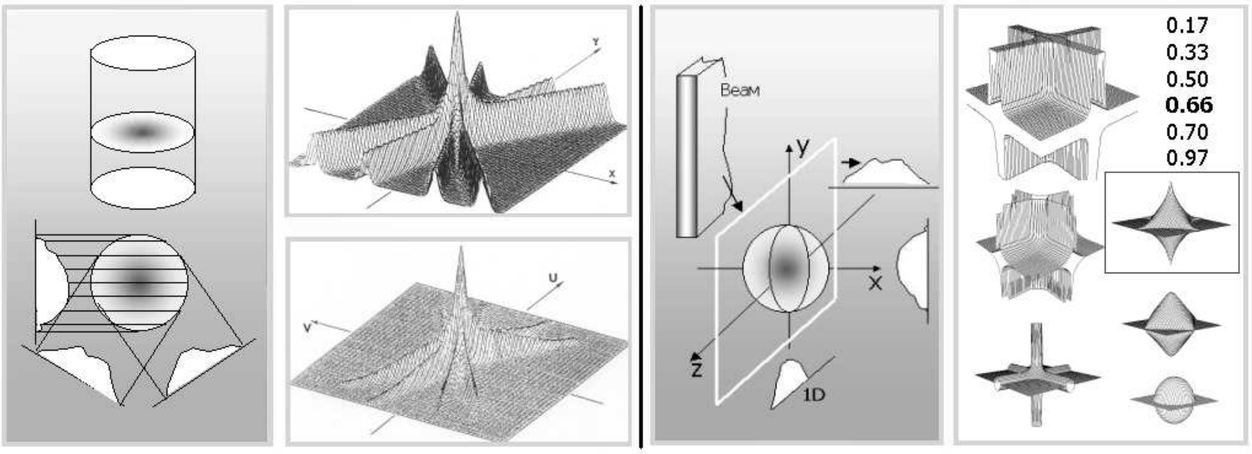


Рис. 2. Геометрия двумерной (2D1D) и трехмерной (3D1D) томографических задач при регистрации одномерных проекций. Трехмерный массив для правого варианта рассчитывается непосредственно по одномерным проекциям, что соответствует условиям трехмерного варианта задачи доплеровской томографии двойных звездных систем. Рядом изображены 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. Трехмерная СПФ представлена с помощью семейства изоповерхностей, уровни интенсивности которых приведены в правом верхнем углу рисунка. Значение максимальной интенсивности нормировано на единицу. Изоповерхность для уровня 0.66 выделена рамкой. Горизонтальные плоскости для изоповерхностей при уровнях 0.5, 0.66, 0.7, 0.97 являются лишь служебными, для уровней 0.17 и 0.33 они соответствуют реальной форме фигур. Максимальный уровень боковых лепестков изображенной СПФ на основе трех ножевых диаграммах равен 0.66

Построение СПФ, или суммарной эквивалентной диаграммы, проводится на основе отдельных ножевых диаграмм.

На рис. 2 представлены примеры суммарных передаточных функций как для двумерной, так и для трехмерной задачи. В первом случае построение СПФ выполнено на основе четырех профилей, во втором — на базе трех передаточных функций, расположенных в соответствии с направлениями главных осей. Приведены также иллюстрации, поясняющие процедуру проецирования. В левой половине рисунка рядом с примером СПФ для двумерной задачи помещено ее изображение в области пространственных частот на U, V-плоскости. Как хорошо видно из рисунка, представленная функция имеет большие области в пределах установленной граничной частоты $\omega_{\text{г}}$, где её отклик равняется нулю. Необходимо решение задачи малоракурсной томографии. При использовании РП это означает сведение к минимуму влияния боковых лепестков соответствующей СПФ, имеющей слабое заполнение области пространственных частот.

Об эффективности РП в сравнении с методом ОФП наглядно свидетельствует пример, приведенный ранее в [6] на рис. 1. Для реконструкции модели радиоастрономическим методом потребовалось в 10 раз меньше ракурсов по сравнению с результатом, полученным с использованием метода ОФП. Как показали эксперименты, эффективность РП в реальных условиях (в присутствии шумов, при неравномерном распределении ракурсов) несколько хуже. Тем не менее, РП позволяет в несколько раз уменьшить необходимое число ракурсов. Левый фрагмент на рис. 2, поясняющий проецирование в двумерной задаче, дополнен фигурой в виде цилиндра и 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 [9]. Однако в доплеровской томографии задача реконструкции осложняется в связи с тем, что 3D-массив должен рассчитываться непосредственно на основе одномерных спектральных профилей, полученных для ракурсов, расположенных лишь на поверхности конуса с учетом углов, соответствующих углу наклонения системы и расположению орбитальных фаз. Построение двумерных сечений на промежуточном этапе в этом случае невозможно. Зона расположения ракурсов существенно ограничена вследствие фиксированного угла наклонения системы. Процедура реконструкции на основе РП предусматривает в этом случае вычисление соответствующей трехмерной СПФ на базе отдельных ножевых диаграмм, а также трехмерного суммарного изображения с использованием обратного проецирования, что позволяет на следующем этапе перейти к решению задачи деконволюции (1) с введением процедуры чистки CLEAN. Пример СПФ для трехмерной задачи, рассчитанной на основе трех ножевых диаграмм (трех элементарных передаточных функций), показан на правом фрагменте рисунка 2. В задаче доплеровской томографии ножевые диаграммы соответствуют передаточным функциям спектрографов, разрешение которых привязывается к радиальным скоростям. При обработке оно может быть понижено в зависимости от сглаживания исходных профилей.

ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ В ТРЕХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Стандартный двумерный вариант доплеровской томографии [1] используется уже на протяжении 20 лет для исследований двойных звездных систем, таких как взрывные переменные, рентгеновские двойные звезды, алголи. Основой служат одномерные профили эмиссионных линий. При знании эфемерид, преобразованных к значениям орбитальных фаз $\Phi(t)$, они пересчитываются в кривые лучевых скоростей $V_R(\Phi)$. На основе набора профилей, которые записаны с высоким разрешением в течение одного или нескольких полных орбитальных циклов, выполняется реконструкция доплеровской томограммы. Томограмма соответствует распределению интенсивности излучения $I(V_x, V_y)$ на частотах некоторой эмиссионной линии в пространстве скоростей. Она суммирует излучение отдельных излучающих элементов в связную картину и может указывать на характерные особенности течения вещества. При некоторых предположениях возможно решение второй задачи — преобразование распределения интенсивности из пространства скоростей $I(V_x, V_y) \rightarrow I(x, y)$ в пространство координат. В [10] представлены, например, синтетические доплеровские томограммы, построенные по результатам газодинамических расчетов. Сопоставление таких томограмм с полученными на основе эксперимента обеспечивает наилучший контроль корректности распознавания характерных особенностей структуры. Несмотря на то, что общий принцип доплеровской томографии [1] допускает введение третьей координаты V_z, до сих пор получил распространение лишь двумерный вариант метода, при котором вводится предположение об отсутствии в системе движений, имеющих компонент скорости V_z, то есть движений в направлениях, отличных от орбитальной плоскости. Результат стандартной реконструкции соответствует двумерной карте распределения интенсивности $I(V_x, V_y)$. Заметим, что в работах последних лет (см., например, [11]) неоднократно отмечалась перспективность развития трехмерного варианта $I(V_x, V_y, V_z)$ с целью получения более адекватной физической картины. Развитие 3D-варианта доплеровской томографии и получение первых результатов [5, 6] связано с введением в процедуру реконструкции радиоастрономического подхода [3, 4], разработанного для малоракурсной томографии.

Проведенная предварительно серия численных экспериментов [12, 13] показала хорошие возможности реконструкции радиоастрономическим методом для характерных задач доплеровской томографии. В стандартном двумерном варианте РП позволил вычислить томографические карты при значительно меньшем числе профилей по сравнению с их количеством, необходимым при использовании метода ОФП. В результате появились возможности как экономить наблюдательное время, так и вычислять томограммы в тех случаях, когда число профилей было ограничено в связи с неблагоприятными обстоятельствами наблюдений. В работе [14] томограммы для двух состояний рентгеновской двойной Лебедь X-1 построены на основе РП с использованием всего лишь 9 и 6 спектральных профилей.

Первая трехмерная доплеровская томограмма построена по экспериментальным данным в линии H_α для двойной системы типа Алголь U Северной короны (U CrB) [6]. Реконструкция выполнялась с использованием РП на основе 47 профилей спектральных линий, полученных в 1994 году при наблюдениях в обсерватории Kitt Peak. Сравнение 3D-томограммы с построенной ранее двумерной томограммой показало сходство основных структурных особенностей в орбитальной плоскости. Вместе с тем, был обнаружен интенсивный газовый поток, имеющий перпендикулярный компонент скорости V_z, равный около 200 км/с, что ранее в стандартном варианте обнаружить было невозможно. Работы по исследованию системы U CrB получили дальнейшее развитие. В [5] представлены трехмерные доплеровские томограммы двух состояний системы. Одно из них характеризуется наличием в системе диска вокруг аккретора, второе имеет ярко выраженный газовый поток вдоль баллистической траектории из точки Лагранжа $L1$ в направлении от звезды-донора к аккретору. Обе трехмерные томограммы указывают на присутствие движений потоков вещества в направлениях, отличных от орбитальной плоскости. С использованием РП по спектрам в линии H_α построена также трехмерная доплеровская томограмма алголя RS Лисички (RS Vul) [7, 15], а по профилям линии He II 4686 Å — трехмерная доплеровская томограмма рентгеновской двойной Лебедь X-1 (Cyg X-1) [8]. На томограммах всех трех двойных систем обнаружены характерные структурные особенности, имеющие существенный компонент скорости V_z. В итоге получены первые результаты о движении газовых потоков в направлениях, отличных от орбитальной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием радиоастрономического подхода к реконструкции, разработанного для малоракурсной томографии, получено решение задачи построения трехмерных доплеровских томограмм. Положено начало и дан толчок развитию процедуры анализа и распознавания движений газовых потоков в двойных звездных системах с учетом компонента скорости V_z, перпендикулярного орбитальной плоскости двойных звездных систем. Получаемая информация более адекватна физической природе объектов по сравнению с возможностями двумерной доплеровской томографии в плоскости $(V_x,\ V_y)$. По экспериментальным данным построены трехмерные доплеровские томограммы трех двойных звездных систем. Анализ их характерных особенностей показал, что во всех этих системах, наряду с движениями газовых потоков в орбитальной плоскости, существуют интенсивные движения потоков вещества, имеющие компоненты скорости V_z, перпендикулярные орбитальной плоскости. В итоге показана перспективность дальнейших исследований на основе трехмерного варианта доплеровской томографии как с целью накопления банка данных трехмерных доплеровских томограмм, так и развития процедуры анализа и распознавания их структурных особенностей.

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за частичную поддержку исследований (гранты 06-02-16234 и 09-02-00993), а также считают необходимым отметить высокий научно-организационный уровень проведения конференции “Kirchhoff-150” и выражают искреннюю благодарность научному оргкомитету за приглашение выступить с докладом.

[1] *Marsh T. R., Horn K.* Images of accretion disks -II. Doppler tomography // Mon. Notic. Roy. Astr. Soc. – 1988. – **235**. – P. 269–286.

[2] *Василенко Г. И., Тараторин А. М.* Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

[3] *Агафонов М. И.* Томография при ограниченном числе проекций. I. Радиоастрономический подход к проблеме и метод 2-CLEAN DSA // Известия вузов. Радиофизика. – 2004. – **47**, № 1. – С. 94–110.

[4] *Агафонов М. И., Шарова О. И.* Томография при ограниченном числе проекций. II. Радиоастрономический метод CLEAN в приложении к трехмерным задачам // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. – **48**, № 5. – С. 367–381.

[5] *Agafonov M. I., Sharova O. I., Richards M. T.* Three-Dimensional Doppler images of the disclike and stream like states of U Coronae Borealis // Astrophys. J. – 2009. – **690**, part 2. – P. 1730–1744.

[6] *Agafonov M. I., Richards M. T., Sharova O. I.* Three-Dimensional Doppler tomogram of gas flows in the Algol-type binary U Coronae Borealis // Astrophys. J. – 2006. – **652**, part 2. – P. 1547–1553.

[7] *Агафонов М. И., Шарова О. И., Richards M. T.* Движения газовых потоков в алголях U Северной короны и RS Лисички по результатам трехмерной доплеровской томографии // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – 2009. – № 6. – С. 353–355. (настоящий выпуск).

[8] *Шарова О. И., Агафонов М. И., Карицкая Е. А. и др.* Трехмерная доплеровская томография рентгеновской двойной Лебедь X-1 // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – 2009. – № 6. – С. 349–351. (настоящий выпуск).

[9] *Календер В.* Компьютерная томография: основы, техника, качество изображений и области клинического использования. Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2006. – 244 с.

[10] *Кузнецов О. А., Бисикало Д. В., Боярчук А. А. и др.* Синтетические доплеровские томограммы газовых потоков в двойной системе IP Peg // Астрон. журн. – 2001. – **78**, 11. – С. 997–1007.

[11] *Steeghs D.* Doppler tomography of accretion in binaries // Astron. Nachr. – 2004. – **325**, N 3. – P. 185–188.

[12] *Sharova O. I.* Doppler tomography for investigation of binary central stars of planetary nebulae: computer modeling // Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond: Proc. of the IAU Symp. N 234. – 2006. – P. 507–508.

[13] *Шарова О. И., Агафонов М. И.* Компьютерное моделирование реконструкции доплеровских томограмм на основе радиоастрономического подхода // Труды Всероссийской астрономической конференции “ВАК 2007”. Изд. Казанского гос. унив., 2007. – С. 270–272.

[14] *Karitskaya E. A., Agafonov M. I., Bochkarev N. G., et al.* Cyg X-1 = V1357 Cyg investigation based on high-resolution optical spectroscopy of 2002–2004 // Astron. and Astrophys. Transactions. – 2005. – **24**, 6. – C. 383–390.

[15] *Richards M. T., Sharova O. I., Agafonov M. I.* Three-dimensional Doppler tomography of the RS Vulpeculae interacting binary // Astro-ph archive, http://archiv.org/abs/0909/2012v1. – 2009. – 12. – C. 5.