

лись в несколько этапов с использованием экранированной двухкомпонентной меры магнитной индукции ЭДММИ. В нашем случае, на стенде, при значительном подавлении существующих промышленных помех, а также вариаций магнитного поля естественного происхождения, удалось произвести прямую оценку собственных шумов испытуемого образца. Средняя спектральная плотность шумов магнитного датчика IMS-008 в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц не превышала $12 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$.

Необходимо отметить, что датчики IMS-008 в течение 2.5 лет непрерывно работали при проведении обсерваторских наблюдений. После окончания работ были проведены измерения АЧХ и ФЧХ датчиков. Выяснилось, что характеристики сохранились с очень большой точностью (примерно 1%). Результаты испытаний и долговременная работа в различных климатических условиях показали, что датчики IMS-008 и IMS-009 обладают высокой стабильностью параметров, исключительно низкими характеристиками шума, очень малым температурным дрейфом, а также стабильной передаточной функцией по температуре и времени. Таким образом, задачи мониторинга естественного электромагнитного Земли поля для различных целевых объектов наиболее успешно могут быть решены с использованием чувствительных, широкополосных и удобных в обращении индукционных датчиков. Дополнительные конкретные примеры результатов, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009 можно найти так же в работе [2].

Список литературы:

- [1] H. C. Séran and P. Fergeau., An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research., Rev. Sci. Instrum. 76, 044502 (2005); <http://dx.doi.org/10.1063/1.1884026> (10 pages)
- [2] Копытенко Evgeny Anatolevich, Palshin Nikolay Alekseevich, Poljakov Sergej Vladimirovich, Schennikov Alexej Vladimirovich, Reznikov Boris Ivanovich, Samsonov Boris Vladimirovich. New portable multifunctional broadband MT System. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop. Abstract. Giza, Egypt , September 18-24, 2010.
- [3] Поляков С. В., Резников Б. И., Шлюгаев Ю. В., Копытенко Е. А. – Первый опыт пространственной дискриминации крупномасштабных естественных КНЧ помех на примере двухпунктовых измерений магнитного поля от искусственного ионосферного источника // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12, стр. 1030–1042.

О.И. Шарова
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
М.И. Агафонов
ФГБНУ «НИРФИ»

ДВУМЕРНАЯ И ТРЕХМЕРНАЯ АСТРОТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОГО ПОДХОДА. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Ключевые слова: тесные двойные звездные системы, 2D и 3D-томография, доплеровская томография, радиоастрономический подход.

Проведено исследование зависимости качества восстановления доплеровских томограмм от числа профилей, полученных при различных орбитальных фазах и от уровня сигнал/шум. Перечислены результаты применения радиоастрономического подхода к реконструкции астротомограмм для алголей и полярков.

Большая часть звезд образует двойные системы, для которых наиболее информативным методом исследования является доплеровская томография [1]. Исходными

данными для доплеровской томограммы служит набор спектральных профилей, т.е. зависимостей спектральной интенсивности от радиальной скорости V_R . Профили получаются в результате наблюдений двойной звездной системы на различных орбитальных фазах. Доплеровская томограмма дает распределение в пространстве скоростей интенсивности излучения $I(V_x, V_y, V_z)$ объекта в данной спектральной линии.

До последнего времени реконструкция доплеровских томограмм выполнялась только в двумерном варианте с априорным предположением, что все движения вещества происходят исключительно в плоскости орбиты двойной системы, т.е. полагалось, что $V_z = 0$. Для построения томограмм использовался метод обратных фильтрованных проекций (ОФП) [2]. В 2005 году авторами предложен радиоастрономический подход (РП) [3] как метод реконструкции внутренней трехмерной структуры объекта. В настоящее время он нашел применение для реконструкции доплеровских томограмм при исследованиях течений в тесных двойных звездных системах. Отдельные вопросы точности восстановления обсуждались в работах [4,5]. В настоящей работе исследовано влияние сокращения числа проекций и зависимость качества восстановления доплеровских томограмм от уровня сигнал/шум.

Компьютерное моделирование включает разработку модели томограммы $I(V_x, V_y)$, получение набора профилей, построение восстановленной томограммы $F(V_x, V_y)$ с использованием суммарной виртуальной передаточной спектральной функции. Для исследования построена модель, в которой отражены основные детали томограммы тесной двойной системы: донор, аккректор, газовый поток из внутренней точки Лагранжа, аккреционный диск, горячее пятно в области пересечения газового потока с диском. Модель представлена на рис. 1, где нанесены орбитальные фазы и показаны некоторые спектральные профили, полученные по этой модели. В действительности спектральные профили получаются в результате наблюдений.

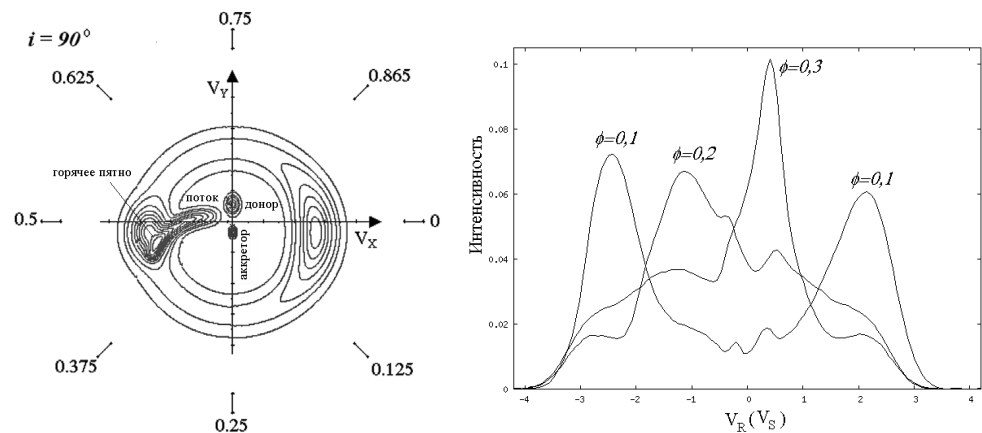


Рис. 1. Модель двойной звездной системы с указанием орбитальных фаз и пример спектральных профилей из набора избранных орбитальных фаз

Зависимость качества реконструкции от числа профилей исследована при моделировании по основе различного числа орбитальных фаз. Одновременно проведено сравнение с реконструкцией, выполненной методом обратных фильтрованных проекций (ОФП). Результаты реконструкций представлены на рис. 2 для угла наклона $i=90^\circ$ с использованием 30 (верхний ряд) и 10 (нижний ряд) профилей. Ошибка реконструкции оценивается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [F(V_{xi}, V_{yj}) - I(V_{xi}, V_{yj})]^2}{\sum_i \sum_j I^2(V_{xi}, V_{yj})}}$$

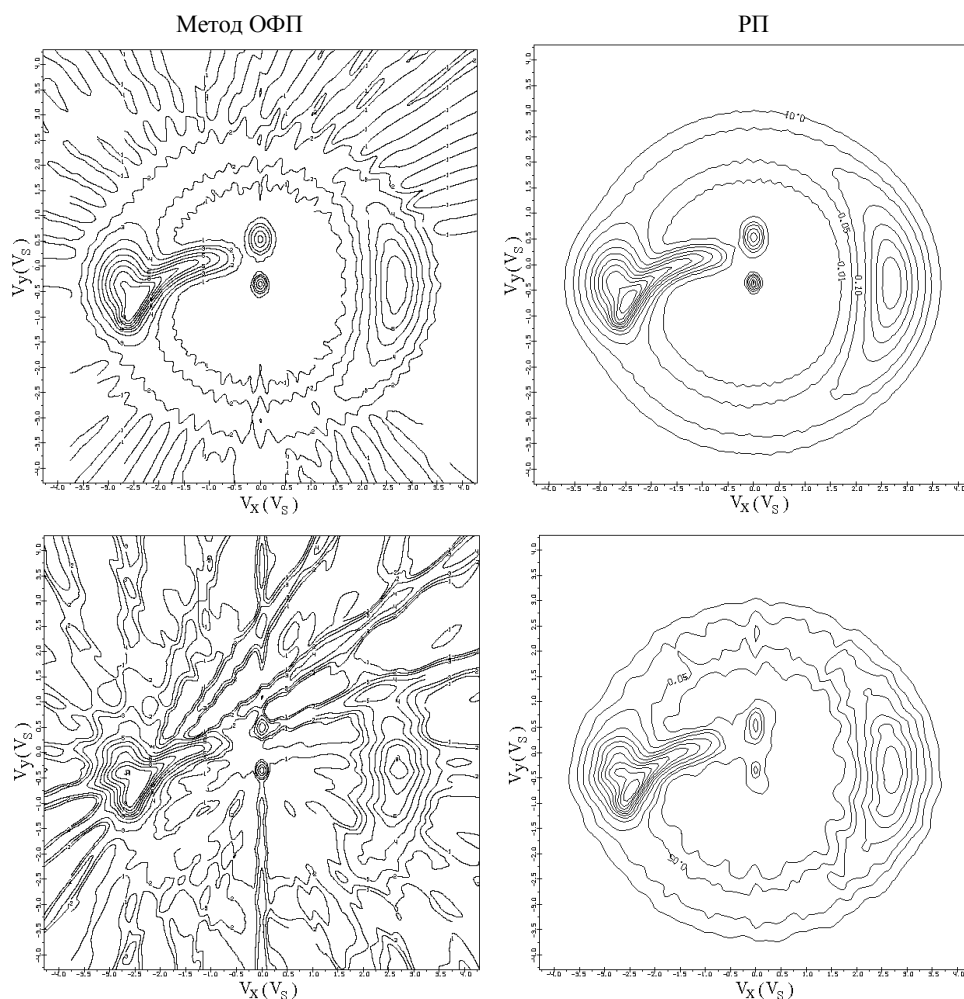


Рис. 2. Реконструкция методами ОФП и РП по 30 (вверху) и 10 (внизу) профилям

Здесь $I(V_{xi}, V_{yj})$ – дискретное распределение спектральной яркости в модели, $F(V_{xi}, V_{yj})$ – дискретное распределение яркости в реконструкции.

Влияние шума. На реальных спектральных профилях всегда есть шумовая составляющая, связанная с аппаратурой и влиянием среды. Чтобы исследовать влияние шума на реконструкцию, добавим случайный шумовой сигнал к спектральным профилям. Для двух значений отношения сигнала к шуму $s=50$ и $s=100$ повторены реконструкции по 30 и 10 профилям методом РП. Зашумленные профили и реконструированные томограммы приведены на рис. 3. Томограммы покрыты шумовой рябью, но качество восстановления остается хорошим: все детали сохраняют свое положение. Фильтрация профилей или томограммы дополнительно повысит качество реконструкции.

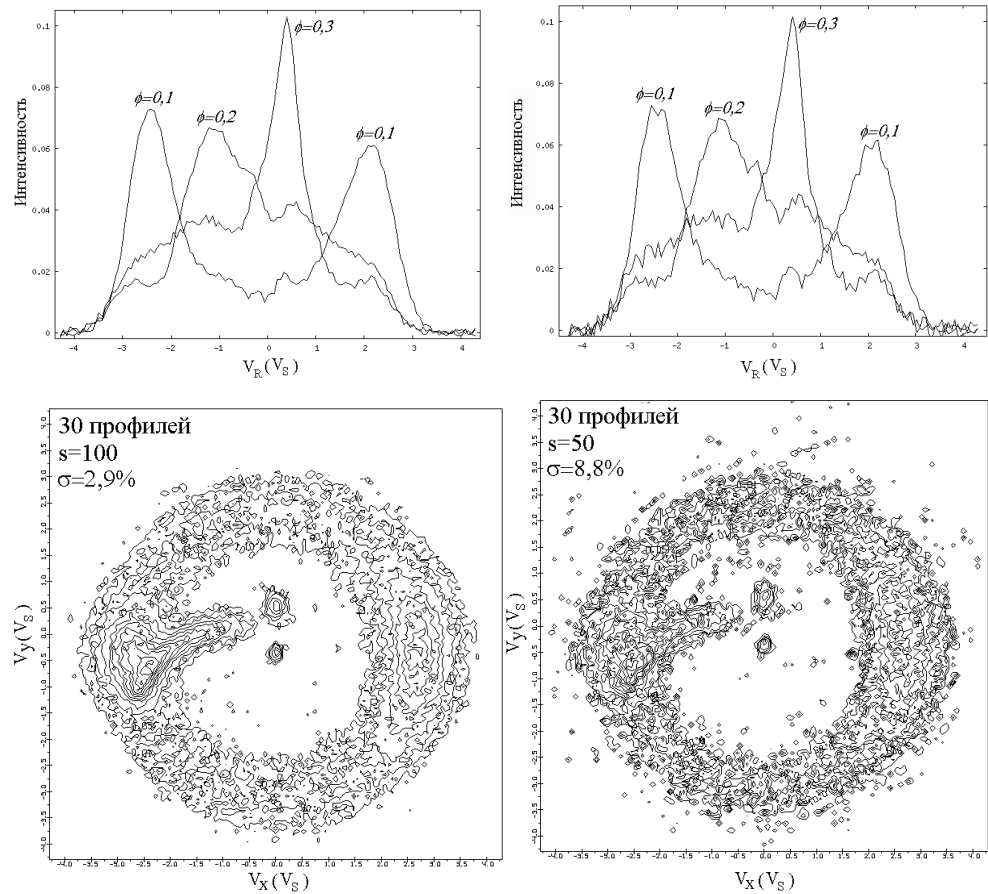


Рис. 3. Реконструкция томограмм по спектральным профилям с отношениями сигнал-шум $s=100$ (справа) и $s=50$ (слева)

Результаты построения томограмм по реальным спектральным профилям. Первый опыт реконструкции доплеровской томограммы был получен в кооперации с группой Е.А.Карицкой (ГАИШ) для рентгеновской двойной звездной системы Лебедь X-1 [5]. Затем была выполнена серия работ в соавторстве с М. Ричардс (США) для алголей U Северной Короны [6,7], RS Лисички [8] и β Персея [9]. Для этих объектов впервые построены трехмерные томограммы. Алголи RS Лисички и β Персея имеют сходство в движении потоков вещества, обнаружены яркие эмиссионные детали на скоростях V_Z более 100 км/с. Структура течений в этих двойных звездных системах свидетельствует о ее магнитной активности. В отличие от них алголь U Северной Короны поток вещества от донора лежит в орбитальной плоскости.

В кооперации с группой ИНАСАН [10] исследована возможность применения трехмерной томографии для исследования газовых потоков в полярах, имеющих сильное магнитное поле и трехмерное движение потоков. Получено хорошее согласие реконструированной томограммы с рассчитанной теоретической моделью.

Для контроля качества реконструкции реальных томограмм использовалось сравнение исходных спектрограмм с контрольными, которые рассчитывались на основе полученной томограммы, использовался χ -квадрат критерий. Пример такого сравнения приведен на рис. 4 для β Персея. Слева показан срез томограммы на скорости $V_X = 40$ км/с, где находится абсолютный максимум интенсивности излучения при $V_Z = 180$ км/с. Справа представлен график χ/χ_c в зависимости от орбитальной

фазы. У всех спектральных профилей это отношение меньше 0,5. Следовательно, различие между исходными профилями и контрольными не является статистически значимым, можно считать что они совпадают.

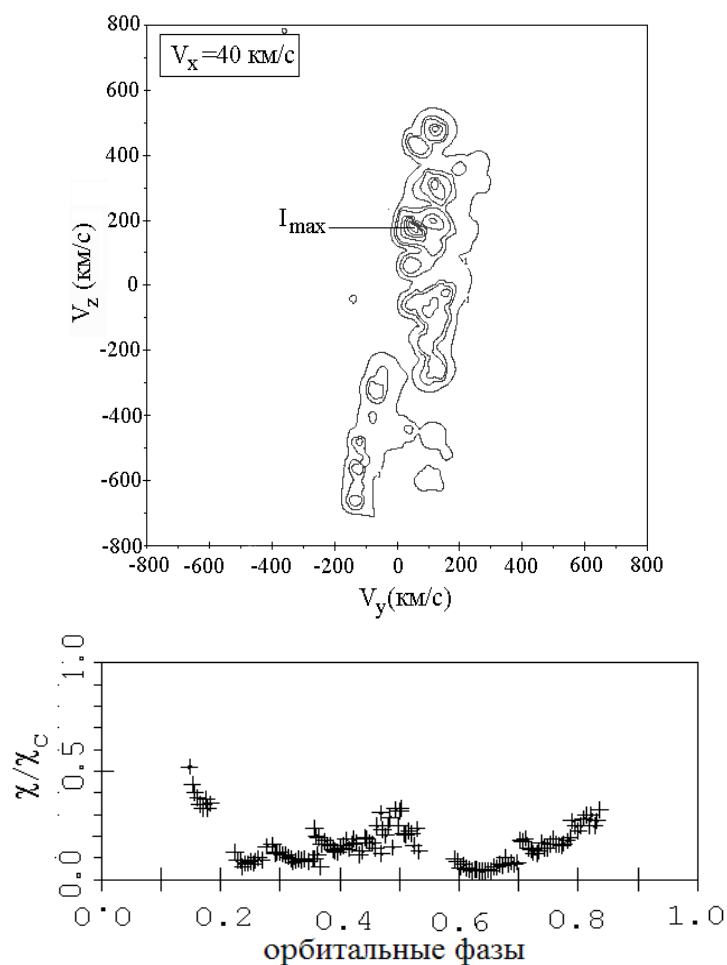


Рис. 4. Одно из сечений томограммы для β Персея и проверка достоверности томограммы

Исходные и контрольные спектрограммы находятся в согласии у всех исследованных объектов, что позволяет надеяться на достоверность трехмерных доплеровских томограмм.

Список литературы:

- [1] Marsh T.R. and K. Horne // Monthly Not. Roy. Astron.Soc. 1988. V. 235, 269–286.
- [2] Bracewell R.N. & Riddle, A.C. // The Astrophysical Journal 1967, V. 150, C. 427–434.
- [3] Агафонов М.И., Шарова О.И. // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2005. Т.48, N5.. С. 367–381
- [4] Sharova O.I. // Proc. of the International Astronomical Union, IAUS 234. 2006, P 507–508.
- [5] Karitskaya E.A., Agafonov M.I., Bochkarev N.G., Bondar A.V., Galazutdinov G.A., Lee B.-C., Musaev F.A., Sapar A.A., Sharova O.I., Shimanskii V.V. // Astron. and Astrophys. Transactions. 2005, V.24, №.6, P. 383–390.
- [6] Agafonov M.I., Richards M.T., Sharova O.I. The Astrophysical Journal 2006, V.652, P. 1547–1553.
- [7] Agafonov M.I., Richards M.T., Sharova O.I.// The Astrophysical Journal 2009. V. 690. P. 1730–1744
- [8] Richards M.T., Agafonov, M.I. Sharova O.I.// The Astrophysical Journal 2010. V.720, № 2, P. 996–1007.

- [9] Richards, M.T., Agafonov, M.I. Sharova O.I. // The Astrophysical Journal, V. 760, The University of Chicago Press, USA, 2012, Issue 1, article id. 8, 10 pp.
- [10] Кононов Д.А., Агафонов М.И., Шарова О.И., Бисикало Д.В., Жилкин А.Г. // *Астрономический журнал* 2014 Т.91, N 12, С. 1–9.