

УДК 524.33, 520.88

Картирование запятненных звезд методом инверсии кривой блеска: тесты и применение к звезде HD 12545

А.И. Колбин, В.В. Шиманский

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Кремлевская 18, Казань
kolbinalexander@mail.ru, Slava.Shimansky@ksu.ru

Поступила в редакцию 23 ноября 2012 г.

Аннотация. Разработан программный код картирования поверхности запятненных звезд, основанный на анализе их вращательно-модулированных кривых блеска. Представлены результаты симуляций восстановления поверхности звезд, выявлены артефакты восстановления, обусловленные некорректной природой задачи. Методика была применена к картированию поверхности запятненной компоненты системы HD 12545.

MAPPING OF SPOTTED STARS VIA LIGHT CURVE INVERSION TECHNIQUE: TESTS AND APPLICATION TO HD 12545, *by A.I. Kolbin, V.V. Shimansky*. The programm code for surface mapping of spotted stars that is based on the analysis of rotational-modulated light curves was developed. The results of simulating star's surface reconstruction are presented, artifacts of reconstruction caused by ill-posed nature of the problem were deduced. The technique was applied to surface mapping of the spotted component of the system HD 12545.

Ключевые слова: запятненные звезды, картирование поверхности звезд

1 Однополосное картирование

Задача картирования поверхности запятненной звезды заключается в разбиении звездной поверхности на элементарные площадки и минимизации функции вида

$$M(I, \lambda) = \|HI - F\|^2 + \lambda S(I)^2, \quad (1)$$

где F – вектор наблюдаемых потоков излучения звезды, а произведение матрицы H и вектора интенсивностей элементов разбиения модели I дает вектор потоков модели. Компоненты матрицы H учитывают телесные углы, под которыми видны элементы разбиения и значения функции потемнения диска к краю. Вид стабилизирующей функции $S(I)$ выбирается из априорных предположений о поведении решения. В случае требования информационной вырожденности решения, функция $S(I)$ имеет вид информационной энтропии (Теребиж, 2005). В случае предположения близости вектора решения к некоторому вектору I^0 , можно использовать метод Тихонова (Тихонов, Арсенин, 1979), в котором стабилизирующий член функции (1) имеет вид $S(I) = \|I - I^0\|^2$. В качестве вектора I^0 можно выбрать вектор средних интенсивностей элементов разбиения модели. Выбор значения параметра регуляризации осуществляется через согласование наблюдаемой и модельной кривой блеска

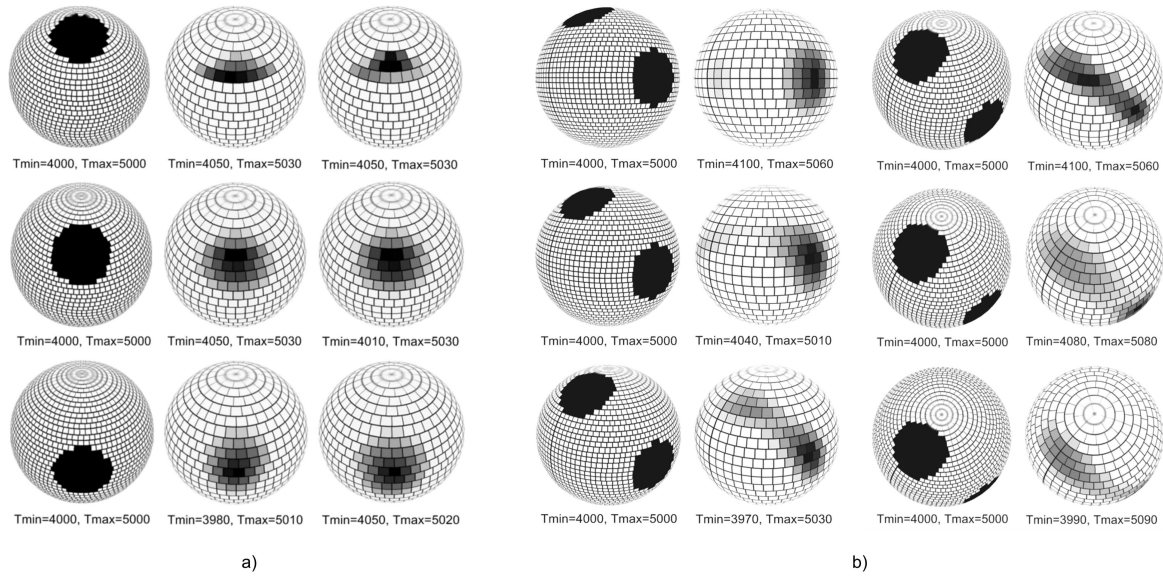


Рис. 1. Примеры восстановления поверхности модели запятенной звезды: а) Восстановление однопятенных поверхностей с различными значениями широты пятна. Широта пятна пробегает значения 75° , 45° , 15° . Слева представлена модельная поверхность, посередине представлен результат однополосного картирования по полосе V , справа показан результат трехполосного BVR -картирования; б) BVR -восстановление двухпятенной модельной поверхности, угол наклона оси вращения которой наклонен к лучу зрения на 90° , 75° , 60° , 45° , 30° , 15°

в рамках известной ошибки наблюдений. Проведенные нами симуляции восстановления поверхности запятенной звезды не показали существенных различий между решениями, полученными на основе метода максимума энтропии и метода Тихонова. Главный недостаток описанных методик состоит в существенном завышении температуры восстанавливаемых пятен. Согласование между наблюдаемой и рассчитанной кривой блеска достигается при этом через увеличение площади пятен. Решением данной проблемы может быть наложение дополнительного условия, требующего равенства температуры восстанавливаемой поверхности пятен их априори известному значению. Идея поиска такого решения была заимствована нами из работы (Гармон, Крюс, 2000) и состоит во введении в стабилизирующий член функции Тихонова диагональной весовой матрицы C , т. ч. $S(I) = \|C(I - I^0)\|^2$. Компоненты матрицы C определяются как $C_{ii} = B > 1$, если $I_i > I_i^0$ и $C_{ii} = 1$ при $I_i \leq I_i^0$.

Тестирование методики проводилось на основе восстановления зашумленных кривых блеска моделей запятенных звезд. На модельные поверхности с температурой фотосферы 5000 K были нанесены круглые пятна радиуса 20° с температурой 4000 K . Угол наклона оси вращения поверхности к лучу зрения имел значение $i = 45^\circ$. Ускорение силы тяжести на поверхности было принято равным $\log g = 4.5$. Кривые блеска каждой поверхности были рассчитаны для полосы V с наложением нормально-распределенного шума со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.005^m$. Расчет интенсивности проводился с использованием линейной модели потемнения диска к краю, параметры которой были взяты из таблиц (Ван Хамме, 1993). Некоторые результаты проведенных симуляций восстановления поверхности представлены на рис. 1. Видно, что координаты пятен, расположенных на низких и умеренных широтах воспроизводятся довольно хорошо, в то время как координаты высокоширотного пятна сильно занижаются. Также заметен эффект растяжения высокоширотного пятна вдоль параллели.

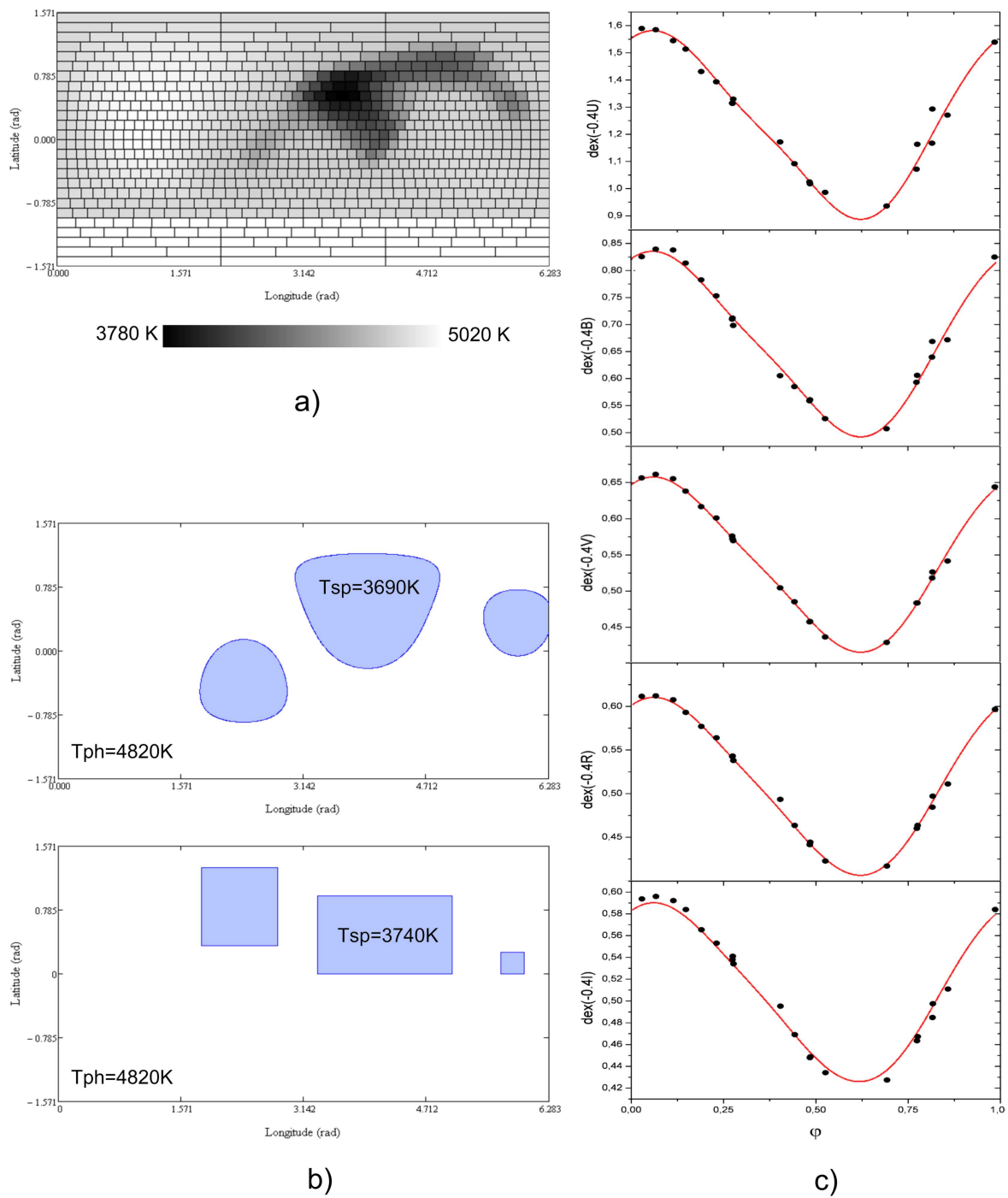


Рис. 2. а) Полученная нами температурная карта поверхности запятенной компоненты HD 12545. б) Карты поверхности HD 12545, полученные Штрассмайером и Олой методами моделирования кривой блеска круглыми и прямоугольными пятнами. в) Наблюдаемые кривые блеска звезды в фильтрах U , B , V , R , I (точки) и кривые блеска восстановленной нами поверхности (непрерывная линия)

2 Многополосное картирование

Уточнение широтного распределения пятен можно ожидать при использовании в процессе восстановления поверхности нескольких кривых блеска, полученных в разных фотометрических полосах. Суть уточнения решения заключается в разности параметров потемнения диска к краю для разных фотометрических полос. Нами был разработан программный код многополосного картирования, некоторые результаты тестирования которого представлены на рис. 1а. В процессе восстановления поверхности использовались зашумленные кривые блеска в полосах B , V , R . При расчете кривых блеска использовались модели запятненных звезд, описанные выше. Связь между интенсивностями в разных фотометрических полосах предполагалась линейной и находилась с использованием таблиц (Куруц, 1994). Видно, что использование нескольких фотометрических полос приводит к некоторому уточнению координат высокоширотного пятна и его профиля в сравнении с результатами однополосного картирования.

На рис. 1б представлены результаты тестирования методики на двухпятенной поверхности при различных значениях угла наклона ее оси вращения к лучу зрения. Широты пятен равны 60° и 0° . Разделение по долготе между пятнами составляет 70° . Радиусы обоих пятен равны 20° . Восстановление поверхности проводилось с использованием данных кривых блеска в полосах B , V , R . Видно, что наилучшее воспроизведение температурного распределения достигается при значениях наклона оси вращения к лучу зрения i , близких к 45° . При $i \rightarrow 90^\circ$ происходит симметризация решения относительно экватора и уменьшение температуры высокоширотных пятен, а при $i \rightarrow 0^\circ$ видно сильное сглаживание температурного профиля пятен.

3 Картирование поверхности запятненной компоненты системы HD 12545

Реализованная методика многополосного картирования была использована для восстановления температурной структуры поверхности запятненной компоненты системы типа RS CVn HD 12545 (XX Tri).

Восстановление поверхности звезды проводилось на основе кривых блеска системы в фильтрах U , B , V , R , I , опубликованных в работе (Штрассмайер, Ола, 1992). Полученная карта распределения температуры по поверхности HD 12545 представлена на рис. 2. На этом же рисунке дано сравнение кривых блеска восстановленной поверхности с наблюдаемыми кривыми блеска звезды. Полученная карта демонстрирует присутствие обширной запятненной области, растянутой примерно на 120° по долготе. Результат неплохо согласуется с температурными картами звезды, полученными Штрассмайером и Олой методом моделирования кривой блеска круглыми и прямоугольными пятнами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ 12-02-97006-А).

Литература

- Ван Хамме (Van Hamme W.) // *Astron. J.* 1993. V. 5. P. 2096.
Гармон, Крюс (Harmon R., Crews L.) // *Astron. J.* 2000. V. 120. P. 3274.
Куруц (Kurucz R.) // SAO CD-Roms. 1994.
Теребиж В.Ю. // Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ. 2005.
Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. // Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1979.
Штрассмайер, Ола (Strassmeier K.G., Olah K.) // *Astron. Astrophys.* 1992. V. 259. P. 595.