

УДК 520.874.3

Особенности обработки солнечных наблюдений, получаемых на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана

В.В. Смирнова^{1,2}, М.А. Лукичева³, В.С. Рыжов⁴

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулковское шоссе, 65/1, Санкт-Петербург, Россия, 196140
vvsvid.smirnova@yandex.ru

²Университет Турку, г. Турку, Финляндия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, Россия

⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Представлены новые методы первичной обработки солнечных наблюдений, получаемых на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рассмотрены наиболее актуальные методики улучшения качества наблюдательных данных.

PROCESSING OF SOLAR OBSERVATIONAL DATA OBTAINED WITH BMSTU RT-7.5 RADIO TELESCOPE, *by V.V. Smirnova, M.A. Loukicheva, V.S. Ryzhov.* New methods for processing of solar observational data obtained with BMSTU RT-7.5 radio telescope are presented. The updated methods for data quality improving are considered.

Ключевые слова: миллиметровые радионаблюдения Солнца, обработка радионаблюдений Солнца, привод антенны, радиотелескоп, миллиметровый диапазон волн, солнечные радионаблюдения

1 Введение

Первичная обработка солнечных наблюдений, получаемых, в частности, в миллиметровом радиодиапазоне, играет ключевую роль при их дальнейшей интерпретации. Как известно, значительный вклад в качество миллиметровых наблюдений вносят погрешности наведения антенной системы, шумы приемной аппаратуры и вариации коэффициента поглощения земной атмосферы (Кисляков, 1970). Учет основных шумов антенной системы радиотелескопа требует использования дополнительных методов при первичной обработке солнечных карт и временных рядов.

2 Радиотелескоп РТ-7.5 МГТУ

Антенна радиотелескопа – двухзеркальная, кассегреневского типа с диаметром главного зеркала 7.75 м, с азимутальной монтировкой и синхронно-слеящими приводами с ошибками слежения не более 2.5 угл. сек для астрономических объектов. Рабочие частоты – 93 и 140 ГГц, ширина диаграммы направленности – 2.5 и 1.5 угл. мин соответственно. Приемная аппаратура радиотелескопа представлена двумя твердотельными супергетеродинными модуляционными радиометрами с рабочими длинами волн 2.2 мм и 3.2 мм и квазиоптической системой разделения каналов. Флуктуационная чувствительность приемников составляет 0.5 К при постоянной времени интегрирования 1 с и ширине эквивалентной полосы 1.5 ГГц.

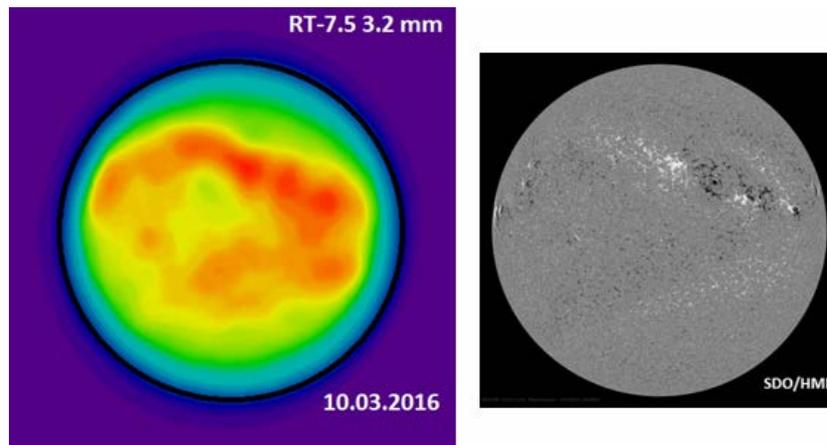


Рис. 1. Изображения диска Солнца, построенные по наблюдениям на РТ-7.5 (частота 93 ГГц, слева) и по данным о распределении магнитного поля по лучу зрения SDO/HMI. Дата наблюдений: 10.03.2016. При сопоставлении карт видно хорошее соответствие ярких радиоисточников с активными областями на магнитограмме

Радиотелескоп позволяет проводить непрерывное картографирование Солнца с помощью растрового сканирования солнечного диска. Размер кадра получаемого изображения 50×50 угл. мин, при этом время построения одной карты составляет 5–8 минут. Изображения выводятся на дисплей с помощью программного обеспечения Helioviewer, позволяющего просматривать их сразу после получения и фиксировать гелиографические координаты в каждой точке кадра. Кроме этого реализована возможность автоматически рассчитывать координаты выбранной активной области для ее сопровождения, определять различные текущие поправки наведения, а также осуществлять сканирование выбранной области на диске. Для улучшения качества изображений используется метод накопления данных (карт) за определенный временной интервал, что позволяет наиболее эффективно выделять яркие источники на диске при первичной обработке и сравнивать их с данными в других диапазонах. Пример карт, накопленных в течение двух часов (на частоте 93 ГГц), представлен на рис. 1 вместе с фотосферной магнитограммой, полученной по данным инструмента Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory (SDO/HMI).

3 Калибровка солнечных карт

Обычно относительная калибровка выходных сигналов приемной аппаратуры осуществляется по двум уровням сигнала – от центра солнечного диска и от неба на удалении 2° по азимуту от центра Солнца. Однако такой метод калибровки не позволяет проводить дальнейшую адекват-

Особенности обработки солнечных наблюдений...

ную оценку значения уровня спокойного Солнца и яркостной температуры источников. Изначально данные наблюдений выводятся в единицах аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для получения радиоизображения, пригодного для анализа, необходимо провести нормировку данных относительно уровня спокойного Солнца. Для этого яркость центра диска Солнца принималась за уровень спокойного Солнца, ей приписывалось значение 1000 условных единиц и карта нормировалась на значение яркости в центре диска. При такой нормировке уровень спокойного Солнца оказывался завышенным, а соответствующий ему контур – охватывающим недостаточно большую область диска (рис. 2, левая панель). Поэтому нами был использован альтернативный метод, предложенный в работе (Нагнибеда, Пиотрович, 1987), где за уровень спокойного Солнца принимается наиболее часто встречающееся значение сигнала в круге радиуса $0.7 R_{\text{sun}}$, где R_{sun} – радиус Солнца на карте.

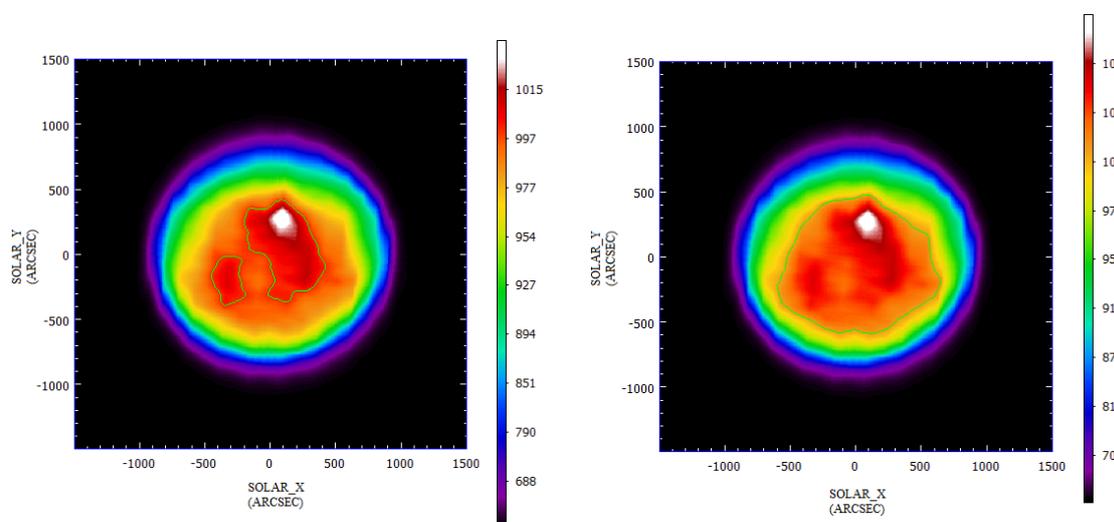


Рис. 2. Слева: изображение солнечного диска по данным РТ-7.5 (93 ГГц). Уровень спокойного Солнца определен по значению от центра диска и равен 1000 единицам. Контур показывает значение уровня спокойного Солнца. Справа: то же изображение, нормированное методом, описанным в работе (Нагнибеда, Пиотрович, 1987)

Такой метод позволяет исключить влияние рассеянного фона диаграммы направленности антенны и наиболее адекватно оценить уровень спокойного Солнца (рис. 2, правая панель; значения приведены в % от уровня спокойного Солнца). Для перевода радиояркости в абсолютные величины используются значения яркостной температуры спокойного Солнца 6400 К и 6600 К на 140 ГГц и 93 ГГц соответственно, полученные на РТ-7.5 методом наблюдений новой Луны. В 2016 году была реализована возможность перезаписи и хранения данных наблюдений в формате FITS. Перекалибровка данных осуществляется с помощью процедур, написанных в программной оболочке IDL SolarSoft.

4 Метод устранения влияния погрешности слежения привода радиотелескопа РТ-7.5 на солнечные наблюдения

Погрешность слежения привода опорно-поворотного устройства (ОПУ) антенны приводит к появлению флуктуаций напряжения на выходе радиоприемника. Эта погрешность (по азимуту или углу места) определяется как разность между фактическим угловым положением азимутального или угломестного ОПУ в некоторый момент времени и программно заданным угло-

вым положением в тот же момент времени. Благодаря применению на РТ-7.5 прецизионных датчиков абсолютного углового положения осей антенной системы, имеющих среднеквадратичную погрешность (СКП) определения текущего угла примерно десятые доли угл. сек, возможна регистрация значений погрешностей слежения привода по двум координатам и использование этой информации в обработке данных для снижения уровня флуктуаций, вызванных наличием координатного шума. Приемлемым значением погрешности наведения направленной антенны считается значение, не превосходящее 10 % от ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности, что эквивалентно снижению коэффициента усиления антенны не более чем на 3 %. Однако это условие можно использовать при наблюдении точечных или низкоконтрастных протяженных радиоисточников (Загорин и др., 2001).

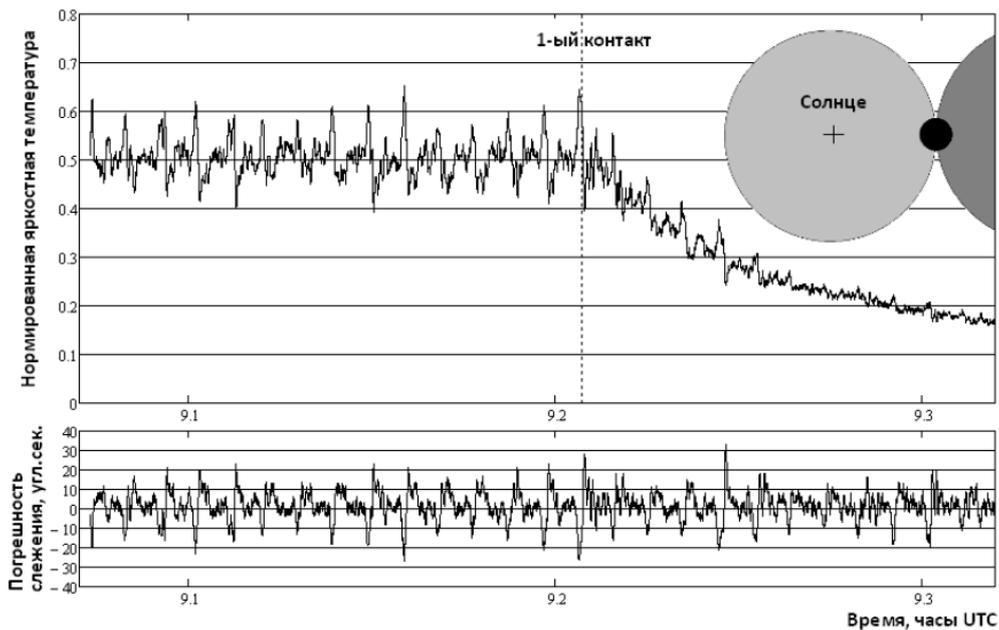


Рис. 3. Запись выходного сигнала радиоприемника на частоте 93 ГГц (вверху) и погрешность слежения (внизу) при наблюдении точки 1-го контакта частного солнечного затмения 20 марта 2015 г.

Для антенны РТ-7.5 диск Солнца является протяженным высококонтрастным радиоисточником с резкой границей (лимбом) и видимым угловым диаметром около 32 угл. мин. В этой связи при наблюдении источников на солнечном лимбе будут наблюдаться значительные погрешности наведения, связанные с координатным шумом. При этом значения флуктуаций сигнала могут составлять до 5 % от уровня спокойного Солнца, т. е. будут соизмеримы с яркостью наблюдаемых активных областей. В качестве примера радиоастрономических данных, полученных при существенном отклонении погрешности слежения привода РТ-7.5 от номинального значения, можно привести записи выходного сигнала радиометра, полученные при наблюдении частного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Эксперимент заключался в сопровождении заранее выбранных точек солнечного диска при покрытии их проходящей Луной. Записанные на выходе затменные кривые затем подвергались обработке на предмет выделения информации о распределении яркостной температуры по солнечному диску. Полученные данные содержали высокий уровень флуктуаций, представляющих собой повторяющиеся выбросы, наиболее заметные в случае сопровождения лимбовых точек 1-го и 4-го контактов (рис. 3).

Последующий анализ записей погрешности слежения по азимутальной координате выявил наличие высокого уровня флуктуаций угла, коррелированных в абсолютном значении с флук-

Особенности обработки солнечных наблюдений...

туациями в записях выходного сигнала (для участка данных, представленных на рис. 2 до 1-го контакта, абсолютное значение коэффициента корреляции составило 0.95). Для поиска источника флуктуаций были построены фурье-спектры этих флуктуаций для обоих сигналов (рис. 4).

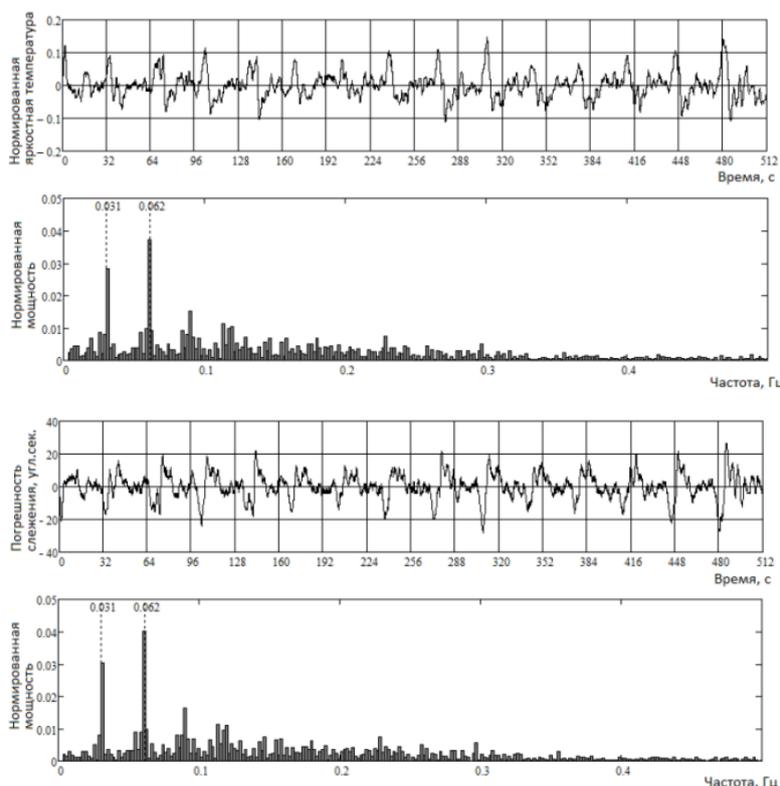


Рис. 4. Сверху: частотный спектр флуктуаций яркостной температуры при наблюдении точки 1-го контакта; снизу: частотный спектр флуктуаций погрешности слежения при наблюдении точки 1-го контакта

В спектрах отчетливо видны два пика с частотами 31 и 62 мГц (периоды 32 и 16 с соответственно). Постоянный период повторения выбросов, а также количество пиков, кратность их частот и наличие флуктуаций только по азимутальной координате указывало на кинематическую погрешность привода.

Для устранения описанных флуктуаций был применен метод, учитывающий возможность высокоточного контроля углового положения осей ОПУ. Обработка отсчетов нормированного выходного сигнала радиометра осуществлялась следующим образом: $u_i = u_i w(x_i, y_i, \Delta x_i, \Delta y_i)$, где u_i – восстановленные отсчеты выходного сигнала, $w(x_i, y_i, \Delta x_i, \Delta y_i)$ – некоторая восстанавливающая функция, x_i, y_i – отсчеты азимутальной и угломестной координаты расчетного положения электрической оси относительно центра солнечного диска соответственно; $\Delta x_i, \Delta y_i$ – отсчеты азимутальной и угломестной погрешности положения электрической оси относительно центра солнечного диска соответственно. Значения восстанавливающей функции в расчетной точке положения луча антенны ($x; y$) находились как отношение двух двумерных сверток модели распределения яркостной температуры и модели диаграммы направленности при отсутствии погрешности слежения (числитель) и наличии наблюдаемой погрешности слежения (знаменатель):

$$w(x, y, \Delta x, \Delta y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(\alpha\beta) D(\alpha - x, \beta - y) d\alpha d\beta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(\alpha\beta) D(\alpha - (x + \Delta x), \beta - (y + \Delta y)) d\alpha d\beta}$$

В качестве модели распределения яркостной температуры применялась модель, включающая солнечный диск с равномерным распределением яркостной температуры. Покрытие лунным диском моделировалось как радиальное смещение луча диаграммы направленности от солнечного лимба. Модель диаграммы направленности строилась на основе экспериментальных данных антенны РТ-7.5 на частоте 93 ГГц и включала главный лепесток и огибающую боковых лепестков в виде двух гауссиан с круговой симметрией.

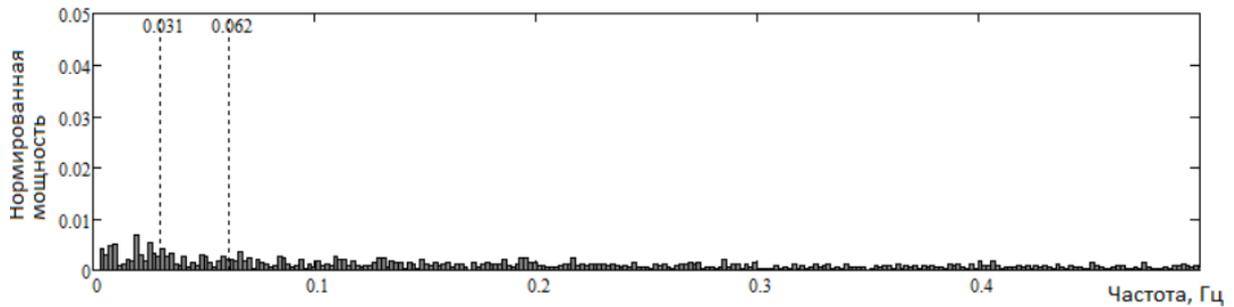


Рис. 6. Частотный спектр остаточных флуктуаций яркостной температуры при наблюдении точки 1-го контакта

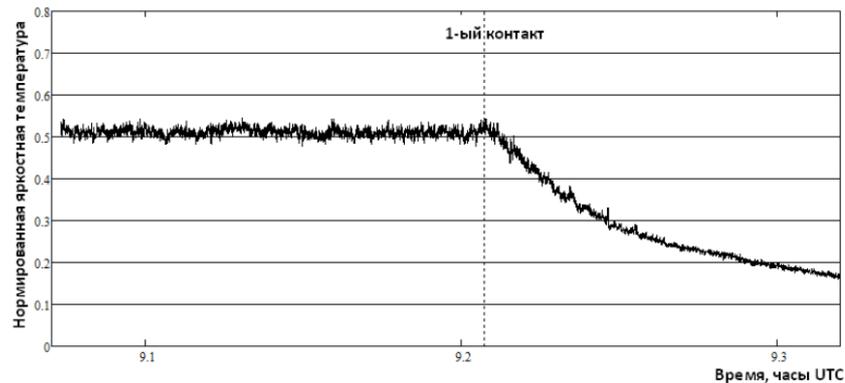


Рис. 5. Результат обработки выходного сигнала радиометра при наблюдении точки 1-го контакта

На рис. 5 представлен результат обработки затменной кривой при наблюдении точки 1-го контакта. На рис. 6 показан фурье-спектр участка записи после применения обработки. Данный метод обработки может быть применен не только к затменным кривым, но и к сигналам, регистрируемым от солнечных вспышек.

5 Выводы

Представлен альтернативный метод обработки солнечных радиоизображений, получаемых на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, позволяющий адекватно оценивать уровень сигнала от спокойного Солнца. Описана новая методика устранения флуктуаций в записях око-

Особенности обработки солнечных наблюдений...

лолимбовых наблюдений солнечного диска, вызванных погрешностью слежения, которая позволяет значительно повысить качество данных.

Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект № 16-02-00749).

Литература

Загорин Г.К., Зражевский А.Ю., Коньков Е.В., Соколов А.В., Титов С.В., Хохлов Г.И., Чёрная Л.Ф. // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 9. С. 3.

Кисляков А.Г. // Успехи физ. наук. 1970. Т. 101. С. 607.

Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. // Труды Астрон. обсерв. Ленингр. ун-та. 1987. Т. 41. С. 5.