УДК 520.272.28

Влияние погрешности сопровождения привода радиотелескопа РТ-7,5 на точность наблюдений Солнца

Рыжов В. С.^{1,*}, Димиев Д. К.¹,
Жаркова Н. А.¹

* v_ryzhov@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрено влияние погрешности сопровождения привода антенны радиотелескопа РТ-7,5 на выходной сигнал радиометрического приёмника при наблюдениях Солнца в диапазоне 3,2 мм. Предложен метод снижения уровня флуктуаций в записях отсчётов выходного сигнала для прилибовых областей солнечного диска не снижающий пространственное разрешение наблюдений. Представлены некоторые результаты первичной обработки затменных кривых частного солнечного затмения 20 марта 2015 г., полученных при высоком уровне флуктуаций выходного сигнала, вызванных неисправностью азимутального привода РТ-7,5. Представлен анализ погрешности сопровождения после устранения неисправности привода.

Ключевые слова: погрешность сопровождения, привод антенны, радиотелескоп, миллиметровый диапазон радиоволн, наблюдения Солнца

Введение

Одним из основных факторов, влияющих на точность радиоастрономических наблюдений с применением остронаправленных зеркальных антенн, является погрешность сопровождения привода опорно-поворотного устройства (ОПУ) антенны, приводящая к флуктуациям напряжения на выходе радиометрического приёмника. Погрешность сопровождения привода определяется как разность между фактическим угловым положением электрической оси антенны в некоторый момент времени и программно заданным угловым положением в тот же момент времени.

Можно выделить три типа основных составляющих погрешности сопровождения привода: погрешность управления, кинематическую погрешность и погрешность, обусловленную внешними факторами.

Погрешности управления связаны с интерполяцией траектории слежения и погрешностью установки выходных параметров управляющих сигналов.

Кинематическая погрешность обусловлена инерцией подвижных частей антенны. В неё входят погрешности, вызванные переколебаниями, люфтами в механических передачах, износом деталей привода и пр.

К погрешностям, определяемым внешними факторами, можно отнести погрешность, вызванную ветровой нагрузкой на элементы конструкции антенны.

Благодаря применению на РТ-7,5 прецизионных датчиков абсолютного углового положения осей антенной системы, имеющих среднеквадратичную погрешность (СКП) определения угла менее 1 угл.сек., возможна регистрация значений погрешностей сопровождения привода по двум координатам и использование этой информации в постобработке для снижения уровня флуктуаций выходного сигнала, вызванных наличием координатного шума [1].

Помимо флуктуаций, обусловленных погрешностью сопровождения привода, при наблюдениях космических радиоисточников в выходном сигнале также будет присутствовать неустраняемая обычными методами составляющая шума, связанная с флуктуациями углов прихода радиоволн, распространяющихся в турбулентной атмосфере Земли. Среднеквадратичное значение флуктуаций углов прихода радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона на приземных трассах может составлять десятки угл.сек. [2]. Данное обстоятельство необходимо учитывать при применении остронаправленных антенн мм-диапазона с шириной диаграммы направленности менее нескольких угл.мин.

Допустимые значения погрешности сопровождения РТ-7,5

Приемлемым значением погрешности наведения направленной антенны считается значение, не превосходящее 10% от ширины диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности, что эквивалентно снижению коэффициента усиления антенны не более чем на 0,12 дБ (3%) при гауссовой аппроксимации главного лепестка ДН [3]. Однако это условие применимо для точечных или низкоконтрастных протяжённых радиоисточников.

Для антенны РТ-7,5, имеющей ширину ДН по уровню половинной мощности на длине волны 3,2 мм равную 2,5 угл.мин., диск Солнца является протяжённым высококонтрастным радиоисточником с резкой границей (лимбом) и видимым угловым диаметром около 32 угл.мин. Значение наблюдаемого радиояркого контраста в ясную погоду и умеренной влажности в мм-диапазоне составляет около 4000 К (центр диска – фон неба) [4].

При наблюдении относительно слабых стационарных локальных образований: активных областей и других разрешаемых ДН антенны деталей видимого солнечного диска вблизи лимба, имеющих наблюдаемый радиояркий контраст относительно уровня спокойного Солнца в пределах до 5% (200 К), будут иметь место помеховые флуктуации выходного сигнала радиометрического приёмника, связанные с наличием координатного шума сопровождения, которые могут значительно превосходить уровень помеховых флуктуаций в случае наблюдения подобных источников вблизи центра диска [5].

Максимальные значения уровня флуктуаций будут наблюдаться при слежении за точкой, лежащей на солнечном лимбе. В этом случае, при наличии погрешности слежения не превышающей 10% от ширины ДН, значения флуктуаций уровня выходного сигнала будут составлять до 5% (200 К) от уровня спокойного Солнца над фоном неба, т.е. будут соизмеримы с радиояркостным контрастом наблюдаемых активных областей. Данное обстоятельство накладывает повышенные требования к системе наведения остронаправленной антенны, проводящей наблюдения прилиम्бовых областей солнечного диска.

Номинальная СКП сопровождения привода РТ-7,5 по каждой угловой координате составляет около 2,5 угл.сек. При таких значениях угловой погрешности, относительная флуктуация уровня выходного сигнала при слежении за точкой на лимбе будет составлять около 2%. Учитывая то, что среднеквадратические значения флуктуаций углов прихода радиоволн ММ-диапазона одного порядка с СКП слежения привода, а также то, что значения относительной флуктуации мощности за счёт рассеяния в турбулентной атмосфере Земли составляют 1..5% [2], можно заключить, что значение СКП слежения привода РТ-7,5 равное 2,5 угл.сек. (1/60 ширины ДН) будет являться приемлемым для проведения радиояркостных измерений по всему солнечному диску. Сравнимые значения СКП слежения имеют большинство полноповоротных радиотелескопов подобного класса в мире.

Первичный анализ данных наблюдения частного солнечного затмения 20 марта 2015 г.

В качестве примера радиоастрономических данных, полученных при существенном отклонении погрешности сопровождении 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 проходящим лунным диском. Записанные на выходе радиометра радиотелескопа данные (затменные кривые) затем подвергались обработке на предмет выделения информации о распределении яркостной температуры по солнечному диску с более высоким пространственным разрешением, чем достигается применением стандартных методов картографирования.

Полученные данные содержали высокий уровень флуктуаций выходного сигнала, представляющие собой повторяющиеся выбросы, наиболее заметные в случае сопровождения точек 1-го и 4-го контактов затмения (рисунок 1).

Последующий анализ записей погрешности слежения по азимутальной координате выявил наличие высокого уровня флуктуаций угла, высококоррелированных в абсолютном значении с флуктуациями в записях выходного сигнала. Для участка данных, представленных на рисунке 1 до времени 1-го контакта, абсолютное значение коэффициента корреляции составило 0,95.

Рисунок 1 – Запись выходного сигнала радиометра (вверху) и погрешность слежения (внизу) при наблюдении точки 1-го контакта частного солнечного затмения 20 марта 2015 г.

Для выявления причины высокого уровня флуктуаций погрешности сопровождения, были построены фурье-спектр записанного выходного сигнала радиометра, а также, фурье-спектр зарегистрированных флуктуаций погрешности слежения (рисунок 2 и рисунок 3 соответственно).

Рисунок 2 – Частотный спектр (внизу) флуктуаций яркостной температуры (вверху) при наблюдении точки 1-го контакта

Рисунок 3 – Частотный спектр (внизу) флуктуаций погрешности слежения (вверху) при наблюдении точки 1-го контакта

В найденных спектрах отчётливо выделяются два пика с частотами 31 и 62 мГц (периоды 32 и 16 с соответственно). Постоянный период повторения выбросов исключал случай погрешности, вызванной ветровой нагрузкой. Количество пиков и наличие кратности их частот значительно снижало вероятность случая погрешности управления и указывало на кинематическую погрешность привода. Наличие флуктуаций только по азимутальной координате сужало поиск источника.

Рисунок 4 – Частотный спектр (внизу) флуктуаций погрешности слежения (вверху) после устранения неисправности привода

Последующее детальное исследование азимутального редуктора выявило существенный люфт в механической передаче вследствие износа, усиленного процессами коррозии.

Устранение неисправности редуктора заменой изношенных деталей к июню 2015 г. позволила существенно снизить амплитуду выбросов погрешности сопровождения РТ-7,5, доведя СКП до номинального значения 2,5 угл.сек. (рисунок 4).

Устранение флуктуаций, вызванных погрешностью сопровождения

Флуктуации сигнала радиометра при наблюдении затмеваемых областей, вызванные погрешностью слежения являются помеховыми и должны быть устранены из записей наблюдений до начала основной обработки затменных кривых на предмет пространственного сверхразрешения локальных источников.

В связи с возможностью высокоточного контроля углового положения осей радиотелескопа, для устранения флуктуаций выходного сигнала целесообразны методы, учитывающие эту информацию, в противовес широко применяемому для той же цели сглаживанию данных, которое, в конечном счёте, приводит к снижению потенциального сверхразрешения источника.

Обработка отсчётов нормированного выходного сигнала радиометра u_i^* осуществлялась следующим образом:

$$u_i = u_i^* w(x_i, y_i, \Delta x_i, \Delta y_i), \quad (1)$$

где u_i – восстановленные отсчёты выходного сигнала; $w(x, y, \Delta x, \Delta y)$ – некоторая восстанавливающая функция; x_i, y_i – отсчёты азимутальной и угломестной координаты расчётного положения электрической оси относительно центра солнечного диска соответственно; $\Delta x_i, \Delta y_i$ – отсчёты азимутальной и угломестной погрешности положения электрической оси относительно центра солнечного диска соответственно.

В свою очередь, значения восстанавливающей функции в расчетной точке положения луча (x, y) находились как отношение двух двумерных свёрток модели распределения яркостной температуры $M(x, y)$ и модели ДН $D(x, y)$ при отсутствии погрешности слежения (числитель) и наличии наблюдаемой погрешности слежения (знаменатель):

$$w(x, y, \Delta x, \Delta y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(\alpha, \beta) D(\alpha - x, \beta - y) d\alpha d\beta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(\alpha, \beta) D(\alpha - (x + \Delta x), \beta - (y + \Delta y)) d\alpha d\beta}. \quad (2)$$

В качестве модели распределения яркостной температуры $M(x, y)$ применялась модель, включающая солнечный диск с равномерным распределением яркостной темпе-

ратуры. Покрытие лунным диском моделировалось как радиальное смещение луча ДН $D(x, y)$ от солнечного лимба.

Модель ДН $D(x, y)$ строилась на основе экспериментальных данных о ДН антенны РТ-7,5 в диапазоне 3,2 мм и включала главный лепесток ДН и огибающую боковых лепестков в виде двух гауссоид с круговой симметрией.

На рисунке 5 представлен результат обработки затменной кривой при наблюдении точки 1-го контакта. На рисунке 6 представлен фурье-спектр участка записи после обработки.

Рисунок 5 – Результат обработки выходного сигнала радиометра при наблюдении точки 1-го контакта

Рисунок 6 – Частотный спектр остаточных флуктуаций яркостной температуры при наблюдении точки 1-го контакта

Заключение

При наблюдениях солнечных прилиimbusовых источников остронаправленной антенной в мм-диапазоне к точности слежения привода радиотелескопа должны предъявляться повышенные требования. Погрешность сопровождения должна быть не хуже 1/60 от ширины ДН.

Анализ фурье-спектров выходного сигнала радиометра, а также флуктуаций погрешности сопровождения привода антенны, позволяет контролировать и своевременно выявлять источники повышенного уровня флуктуаций погрешности сопровождения.

Приведённая методика устранения флуктуаций в записях затменных и прилиम्бовых наблюдений солнечного диска, вызванных повышенной погрешностью сопровождения, позволяет обрабатывать исходные данные без снижения потенциального пространственного разрешения наблюдаемой области диска.

Список литературы

1. Парщиков А.А., Михайлицкий В.П., Соловьёв Г.Н. и др. Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ вчера, сегодня, завтра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия". – 2009. – С. 176 – 186.
2. Загорин Г.К., Зражевский А.Ю., Коньков Е.В., Соколов А.В., Титов С.В., Хохлов Г.И., Чёрная Л.Ф. Факторы, влияющие на распространение ММ волн в приземном слое атмосферы // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 9.
3. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973.
4. Лукичёва М.А. Структура и динамика солнечной хромосферы на основе наблюдений в миллиметровом диапазоне [Электронный ресурс]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.02. – М.: РГБ, 2005 (из Фондов Российской Государственной Библиотеки).
5. V. Smirnova, A. Riehoainen, V. Ryzhov, A. Zhiltsov, J. Kallunki. Long-period oscillations of millimeter emission above sunspots. Astronomy & Astrophysics 534, A137 (2011).

Impact of RT-7.5 Radio Telescope Driver Tracking Errors on the Sun Observation Accuracy

V.S. Ryzhov^{1,*}, D.K. Dimiyev¹,
N.A. Jarkova¹

[*v_ryzhov@mail.ru](mailto:v_ryzhov@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: error tracking, antenna drive, radio telescope, millimeter range of radio waves, observations of the Sun

A radio telescope driving system is to provide continuous tracking of a celestial source. A point source tracking error shall be less than 10% of an antenna pattern width. To observe the solar disk portions near the limb, need a higher precision tracking. The RMS error for the sun observations on radio telescope RT-7.5 BMSTU at a 3 mm wavelength should not be more than a few arc-seconds. The paper considers a problem to eliminate the influence of tracking error at the output of the telescope's radiometer. Filtering is the main way to reduce the output signal fluctuations. The disadvantage of filtering is the suppression of the noise signal frequency related to the signal source. To solve the problem is proposed a method using data on the angular position of the antenna axes with high accuracy of the absolute angle sensor. The method consists in finding the compensating function linking the angular fluctuations of the angular position of the antenna with the fluctuations of the output of the radiometer. The method was used for the initial processing of the observation data of the partial solar eclipse on March 20, 2015 through the radio telescope RT-7.5. Data analysis revealed that there were strong interference fluctuations of the output signal. The frequency spectrum of the fluctuations tracking error contained two peaks with periods of 16 and 32 seconds, caused by the azimuth gear backlash. The data processing allows reducing the level of interference fluctuations of the recorded signal by an order of value. The developed method can significantly reduce the level of interference fluctuations of the radiometer telescope output signal caused by low pointing accuracy without loss of the desired signal components.

References

1. Parshchikov A.A., Mikhailitskii V.P., Solov'ev G.N. et al. Radioteleskop RT-7,5 MGTU vchera, segodnia, zavtra. *Vestnik MGTU Im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering]*. Special is-

- sue. Radiolocation, satellite navigation and communications, radioastronomy. 2009. P. 176-186. [In Russian]
2. Zagorin G.K., Zrazhevskii A.Iu., Kon'kov E.V., Sokolov A.V., Titov S.V., Khokhlov G.I., Chernaia L.F. Faktory, vliiaiuschie na rasprostranenie MM voln v prizemnom sloe atmosfery. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2001. No. 9. [In Russian]
 3. Esepkina N.A., Korol'kov D.V., Pariiskii Iu.N. Radioteleskopy i radiometry [Radio telescopes and radiometers]. *Nauka = Science*. Moscow, 1973. [In Russian]
 4. Lukicheva M.A. Struktura i dinamika solnechnoi khromosfery na osnove nabliudenii v millimetrovom diapazone [Electronic resource]: Dissertation ... Cand. of Physical and Mathematical Sciences: 01.03.02. *Russian State Library*. Moscow, 2005 (from funds of the Russian State Library). [In Russian]
 5. V. Smirnova, A. Riehoakainen, V. Ryzhov, A. Zhiltsov, J. Kallunki. Long-period oscillations of millimeter emission above sunspots. *Astronomy & Astrophysics*, 534, A137, 2011.