

Д. Е. Коротеев, И. В. Крючков,
В. Ю. Лоскутов

ОЦЕНКА И КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА РАДИОВИДЕНИЯ

Рассмотрена оценка и коррекция систематических ошибок угловых измерений для полноповоротной зеркальной антенны радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ радиоастрономическим методом с использованием радиоизлучения Солнца. Результаты работы планируется использовать при создании радиолокационной системы радиовидения космических объектов миллиметрового диапазона на базе данной антенны.

E-mail: niiret@yandex.ru

Ключевые слова: радиовидение, радиотелескоп, коррекция ошибок наведения антенной системы, радиоастрономический метод, миллиметровый диапазон.

В НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана в настоящее время разрабатывается радиолокационная система (РЛС) миллиметрового диапазона на базе западной антенны радиотелескопа РТ-7.5, предназначенная для высокоточного измерения координат и построения радиоизображений низкоорбитальных космических объектов [1].

Одна из технических проблем, возникшая в ходе разработки данной системы — юстировки электрической оси антенны и связанная с ней задача коррекции систематических ошибок угловых измерений. Необходимость коррекции обусловлена малыми размерами луча диаграммы направленности антенны (ширина диаграммы направленности всего 4 угл. мин).

Общий подход к юстировке зеркальных осесимметричных антенн рассмотрен в работе [2]. В данной работе для коррекции систематических ошибок угловых измерений предлагается применить радиоастрономический метод, суть которого заключается в использовании естественных источников радиоизлучения с известным положением в пространстве. Преимуществами данного метода по сравнению с «наземными» методами, использующими передатчики на вышках, являются сравнительная простота, исключение необходимости в громоздких и дорогостоящих вышках, а также возможность юстировки при ориентации главного лепестка диаграммы под разными углами места.

Обзор основных источников естественного излучения приведен в работе [3]. В качестве эталонного источника радиоизлучения в данной работе было выбрано Солнце, так как в миллиметровом диапазоне оно имеет яркостную температуру около 7 000 К, что позволяет наблюдать его с использованием приемной части РЛС. Кроме того, местоположение Солнца известно с высокой точностью [4] и наблюдать его можно ежедневно, хотя диапазон наблюдения несколько ограничен по зенитному углу.

По происхождению систематические ошибки угловых измерений больших зеркальных антенн можно условно разделить на следующие виды [5, 6]:

- ошибки геодезической привязки и юстировки;
- ошибки в установке нуль-пунктов датчиков углового положения антенной системы;
- ошибки из-за радиорефракции в атмосфере [7];
- ошибки установки осей вращения антенны;
- ошибки, связанные с неточностью изготовления механизма привода (отклонения формы шестерней редуктора и т. п.);
- ошибки, обусловленные деформациями опорно-поворотного устройства и зеркальной системы под воздействием гравитационных сил.

В данной работе рассмотрена методика оценки ошибок связанных с нуль-пунктами датчиков антенны и с неточной установкой осей вращения антенны путем юстировки по экспериментальным данным.

Получение экспериментальных данных состоит из нескольких итераций в течение дня, каждая итерация включает следующие этапы:

- 1) расчет траектории движения Солнца согласно модели [7];
- 2) прохождение антенны с азимутальным сечением вдоль Солнца с записью принятого сигнала и оценка положения центра Солнца по углу места;
- 3) прохождение антенны с угломестным сечением поперек Солнца с записью принятого сигнала и оценка положения центра Солнца по азимуту.

Пример угломестной диаграммы прохождения по Солнцу показан на рис. 1. Диаграмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала принятого при сканировании поперек солнечного диска от времени и угла места после усреднения. На диаграмме также показан пороговый уровень, используемый для нахождения центра Солнца.

На основании полученных описанных выше способом данных были оценены параметры модели отклонения осей антенной системы. В качестве такой модели в данной работе использована модель вращения антенной системы по двум осям: угломестной и азиму-

тальной. Углы отклонения осей вращения антенной системы представлены на рис. 2. На рисунке сплошной вертикальной линией показано измеренное положение центра Солнца, пунктирной — ожидаемое положение центра Солнца, горизонтальная линия показывает значение порога, используемого для нахождения центра Солнца.

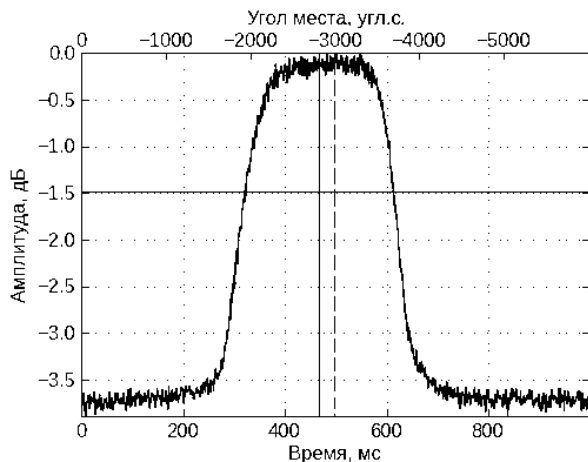


Рис. 1. Диаграмма вертикального сканирования вдоль солнечного диска

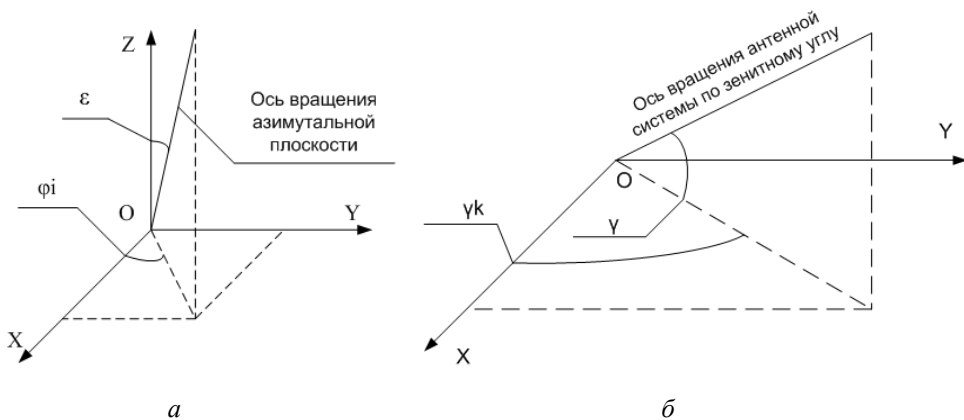


Рис. 2. Отклонения оси вращения:

a — азимутальной плоскости; *b* — антенной системы по зенитному углу

В используемой модели учет осей вращения выполняется по следующей формуле:

$$\mathbf{O}\mathbf{V} = \mathbf{OZ}(\varphi_i)\mathbf{OY}(\varepsilon)\mathbf{OZ}(-\varphi_i)\mathbf{OZ}(\varphi)\mathbf{OX}(\gamma)\mathbf{OY}(-\beta)\mathbf{OZ}(-\gamma_k) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где \mathbf{OV} — координаты вектор-направления на объект при заданных углах поворота; ε, φ_i — значения отклонения оси вращения азимутальной плоскости от оси \overline{OZ} по углу места и по азимуту, соответственно; γ — отклонение оси вращения по зенитному углу от азимутальной плоскости; γ_k — отклонение электрической оси антенны от плоскости вращения; β — измеренный угол места; φ — измеренный азимут.

Функции $OX(\alpha), OY(\beta), OZ(\delta)$ — матрицы поворота вокруг соответствующих осей на соответствующие углы,

$$OX(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix};$$

$$OY(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix};$$

$$OZ(\delta) = \begin{pmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) & 0 \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В используемой модели решена обратная задача нахождения измеренных углов места и азимута при известном направлении электрической оси антенной системы. Введем вспомогательный вектор

$$R = (OZ(\varphi_i)OY(\varepsilon)OZ(-\varphi_i))^{-1} R_{\text{напр}},$$

где $R_{\text{напр}}$ — требуемое направление для электрической оси антенной системы. Тогда измеренные углы места и азимута определяются следующими формулами:

$$\beta = \begin{cases} a \sin\left(\frac{R_2 + \sin(\gamma)\sin(\gamma k)}{\cos(\gamma)\cos(\gamma k)}\right) \pm 2\pi k, \\ \pi - a \sin\left(\frac{R_2 + \sin(\gamma)\sin(\gamma k)}{\cos(\gamma)\cos(\gamma k)}\right) \pm 2\pi k, \end{cases} \quad (1)$$

где $k \in Z$;

$$A = \cos(\gamma k) \cos(\beta); \quad (2)$$

$$B = \cos(\gamma k) \sin(\gamma) \sin(\beta) + \cos(\gamma) \sin(\gamma k);$$

$$\varphi = \pm a \cos\left(\frac{R_0}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) + a \cos\left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) \pm 2\pi l, \quad (3)$$

где под β в формулах (2) и (3) понимается полученное в формуле (1) значение и $l \in Z$.

Для юстировки антенной системы необходимо найти углы: ε , φ_i ; γ и γ_k . Основой используемой методики оценки углов смещения является статистическая обработка результатов радиоастрономических измерений по эталонным объектам. Для обработки необходим набор положений антенной системы, при которых известно действительное направление луча антенной системы и расчетное.

Алгоритм статистической оценки углов смещения состоит в следующем:

1) по известному расчетному положению антенной системы по формулам (1) и (3) вычисляются измеренные углы для использовавшегося при измерении набора углов смещения;

2) по рассчитанным (или полученным с системы измерения) углам места и азимута рассчитывается действительное направление луча антенной системы. При этом используется анализируемый набор углов смещения в случае, если действительное направление не совпадает с расчетным направлением антенной системы;

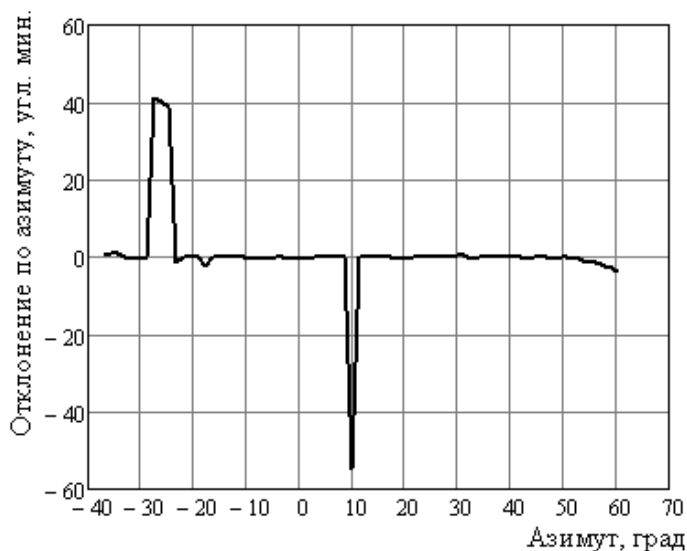
3) по степени совпадения расчетного направления антенной системы с действительным направлением луча антенной системы оценивается качество анализируемого набора углов смещения.

Измерения реальной антенной системой показали, что отклонение истинного направления от получаемого по углу места относительно велики, при малом отклонении азимутального направления. Значения отклонений по углу места и азимуту от значения азимута измерения показаны на рис. 3. Выбросы на графиках являются ошибками эксперимента, связанными с нестабильной работой аппаратного обеспечения.

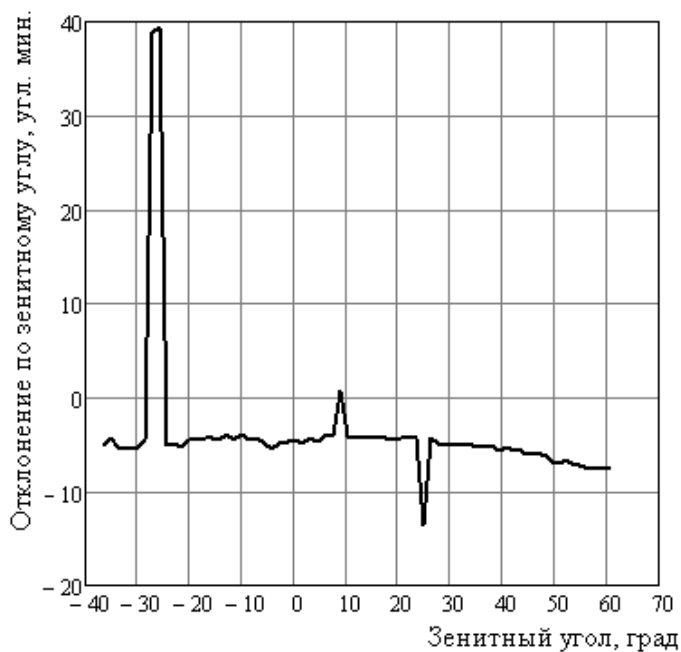
Коэффициенты, соответствующие истинному значению, определялись методом математической оптимизации. В качестве численного алгоритма многопараметрической оптимизации был использован метод роя частиц [8].

Функцией оценки результата оптимизации в рассматриваемой задаче является среднее значение отклонения, построенного для рассчитываемых параметров. Численным методом оптимизации удалось

получить набор корректирующих констант, уменьшающий ошибку оценки углового положения в несколько раз.



a



б

Рис. 3. Зависимость отклонения от измеренного параметра:

a — по азимуту; *б* — по зенитному углу

Предложенная методика с незначительными изменениями может быть использована при калибровке других антенн подобного типа.

Дальнейшим развитием работы может являться усложнение используемой модели и расширение списка оцениваемых систематических ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедов С. И., Крючков И. В., Коротеев Д. Е. Перспективный радиолокационный комплекс радиовидения космических объектов миллиметрового диапазона // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Радиолокация, спутниковая навигация и связь. – 2009. – С. 48–53.
2. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
3. Крохин В. В. Информационно-управляющие космические радиолнии: В 2 ч. Ч. 2. – М., 1993. – 212 с.
4. Meeus, J. Astronomical algorithms. Richmond: Willman-Bell, Inc., 1991. – 430 p.
5. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
6. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.П. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
7. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. – М.: Сов. радио, 1976. – 221 с.
8. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942–1948.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012