

Метод фазирования сегментированного главного зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметр»

Д. Т. ПУРЯЕВ, В. И. БАТШЕВ, А. В. КАПУСТИН, Н. А. ГРАФ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия,
e-mail: batshev.vlad@gmail.com

Проанализировано влияние погрешностей позиционирования сегментов параболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметр» на функцию рассеяния точки. Разработан метод контроля фазирования составного параболоида, основанный на применении вспомогательных конических зеркал, конструктивно соединенных с сегментами параболоида. Предложен метод контроля формы центральной части параболоида.

Ключевые слова: телескоп, составное зеркало, фазирование, адаптивная оптика.

The influence of errors of parabolic mirror segments positioning in space radio telescope «Millimetron» on the point spread function has been analyzed. A segmented paraboloid phasing control method based on application of auxiliary conic mirrors mechanically coupled with paraboloid segments has been developed. The method for paraboloid central part form control is suggested.

Key words: telescope, segmented mirror, phasing, adaptive optics.

Создание обсерватории «Миллиметр» (проект «Спектр-М») [1—3] выполняется в рамках Федеральной космической программы в Астрокосмическом центре Физического института им. П. Н. Лебедева РАН под руководством академика Н. С. Кардашева. Предполагается создание космической обсерватории для исследований различных объектов в спектральном диапазоне 20 мкм — 20 мм на основной длине волны 300 мкм.

В качестве оптической системы телескопа выбрана система Кассегрена, показанная на рис. 1, а [4, 5]. Главное зеркало имеет форму параболоида и является составным, его диаметр 10 м, фокусное расстояние 2,4 м. Вторичное зеркало — гиперболическое, диаметр 550 мм, радиус кривизны при вершине 255 мм, квадрат эксцентриситета 1,147. Расстояние между вершинами зеркал составляет 2277 мм. Фокус F телескопа удален от вершины главного зеркала на 1300 мм и совмещен с действительным геометрическим фокусом F_1 гиперболоида. Фокус F_0 параболического зеркала совпадает с мнимым геометрическим фокусом F_2 гиперболоида. Особенность оптической системы телескопа заключается в том, что вторичное гиперболическое зеркало расположено внутри стрелки прогиба главного зеркала. Та-

кое расположение исключает прямое попадание солнечных лучей на гиперболическое зеркало.

Главное зеркало состоит из центрального монолитного параболического зеркала диаметром 3 м с отверстием, имеющим диаметр 600 мм, и 72 внеосевых сегментов, расположенных в 24 секторах на 3 ярусах (см. рис. 1, б). Геометрические размеры и форма отражающих поверхностей сегментов одного яруса одинаковы, но отличаются от размеров и формы сегментов в других ярусах. В рабочем состоянии внеосевые сегменты параболоида и центральное зеркало должны составлять единую поверхность, адекватную по оптическому действию монолитному параболоиду.

Конечная цель фазирования — формирование на выходе из телескопа бесступенчатого волнового фронта, т. е. сферической поверхности равных фаз электромагнитных колебаний. Допустимая высота так называемой ступеньки волнового фронта согласно критерию Марешаля не должна превышать 20 мкм для основной длины волны 300 мкм. С точки зрения геометрической оптики поставленную цель можно достигнуть, когда оптические оси всех сегментов, центрального зеркала и гиперболоида объединены в единую ось, а фокусы сегментов и центрального зеркала совмещены с фокусом F_2 . Кроме того, фокусные расстояния всех сегментов и центрального зеркала должны быть равны (погрешность ± 10 мкм), что при фокусном расстоянии параболоида более 2 м является сложной технологической проблемой.

Главная трудность фазирования заключается в поиске приемлемого способа получения информации о пространственном положении каждого сегмента относительно оптической оси и фокуса параболического зеркала. В реальном телескопе каждый сегмент можно установить в пространстве с конечной точностью фазирования, требуемой для оптической системы. В настоящей работе принято считать задачу фазирования сегментов выполненной, когда дифракционные изображения звезд в фокусе телескопа на длине волны 300 мкм и телескопа с идеально фазированным главным зеркалом незначительно отличаются, а именно — диа-

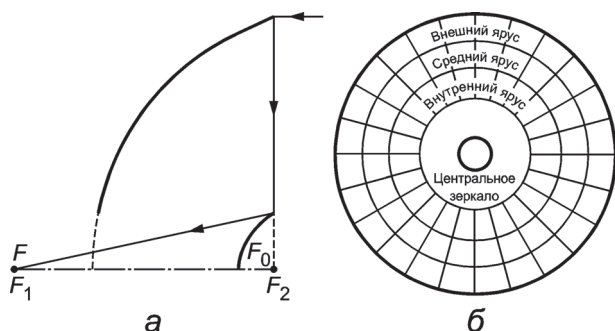


Рис. 1. Оптическая схема телескопа (а) и апертура главного зеркала (б)

метр кружка Эйри отличается не более чем на 10 %, его эллиптичность не превышает 5 %, координаты центра не выходят за пределы кружка Эйри в идеально фазированной системе, возмущения поля за пределами кружка минимум на порядок меньше максимальной интенсивности в дифракционном пятне.

Моделирование оптической системы телескопа. На вход оптической системы направляли плоский волновой фронт с длиной волны 300 мкм. Приемник излучения был размещен в фокальной плоскости телескопа. Каждый сегмент независимо от остальных смещался вдоль осей координат Ox , Oy , Oz и поворачивался вокруг каждой из них (центр вращения располагался в центре соответствующего сегмента). Смещения и повороты были случайными величинами в заданных интервалах (закон распределения вероятности — равномерный). Интервалы смещений dx , dy , dz и поворотов $d\alpha$, $d\beta$, $d\gamma$ подбирали так, чтобы погрешности позиционирования сегментов параболоида несущественно влияли на дифракционное изображение звезды в фокальной плоскости телескопа. В результате моделирования получены следующие интервалы возможных смещений и поворотов сегментов: $dx = dy = dz = \pm 50$ мкм, $d\alpha = d\beta = d\gamma = \pm 30''$. Погрешность фазирования параболического зеркала не должна превышать указанные интервалы. При моделировании погрешности изготовления каждого сегмента не учитывали, поскольку для операции фазирования они являются систематическими и не влияют на чувствительность системы радиотелескопа к децентрированию сегментов.

Метод контроля позиционирования сегментов зеркала. Идея предлагаемого метода заключается в применении кольцевого конического зеркала, на которое падает осевой пучок параллельных лучей, отраженных от параболического сегмента. Оси сегментов и конических зеркал совмещены. Каждый параболический сегмент жестко соединен с соответствующим кольцевым коническим зеркалом, находящимся на внешнем краю сегмента. Внутренняя отражающая поверхность конуса преобразует параллельный пучок лучей в линию. Также преобразование возможно, если пучок параллельных лучей, падающий на конус, параллелен оси конической поверхности, а коническая поверхность, в свою очередь, является правильной, т. е. имеет осевую симметрию и образована вращением отрезка прямой вокруг оси. Когда эти условия соблюдены, коническое зеркало фокусирует параллельный пучок лучей в линию, лежащую на оси конической поверхности. На рис. 2 показан ход лучей, отраженных от внешнего сегмента зеркала 1. Ход лучей, попадающих на остальные сегменты, аналогичен описанному.

В предлагаемой схеме контроля точечный источник света расположен в действительном фокусе F_1 контррефлектора 3. При отражении от него образуется сферический волновой фронт с центром в фокусе F_2 . Если контролируемый сегмент параболоида правильно ориентирован в пространстве (т. е. оси параболического сегмента и гиперболоида совпадают и фокус параболического сегмента совмещен с мнимым фокусом гиперболоида), то волновой фронт, отраженный от сегмента параболоида, будет плоским и на кромку сегмента попадет строго параллельный пучок лучей. Угол раствора конической поверхности 2 рассчитывают так, чтобы параллельный пучок лучей, поступающий на внутреннюю

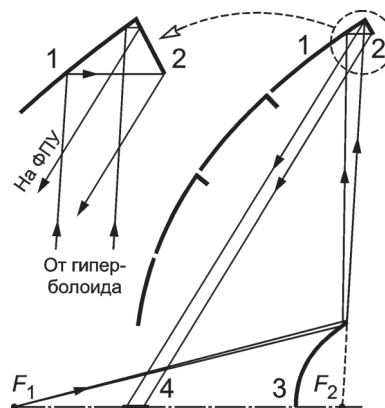


Рис. 2. Схема контроля положения сегментов главного зеркала: 1 — сегмент внешнего яруса параболоида; 2 — вогнутое коническое зеркало; 3 — контррефлектор; 4 — фотоприемное устройство (ФПУ)

поверхность конической кромки, фокусировался в линию вблизи вершины параболоида, где в предлагаемой схеме контроля установлено фотоприемное устройство (ФПУ) 4. Чувствительная площадка ФПУ лежит на оптической оси системы и перпендикулярна плоскости рисунка. В процессе контроля очередного сегмента параболоида на приемнике излучения формируется изображение в виде линии, которое создает коническая кромка каждого сегмента. По положению, размеру и интенсивности этого изображения можно сделать заключение о расположении данного сегмента параболоида.

Для фазирования зеркала с помощью разработанного метода необходимо отъюстировать вторичное зеркало и центральный параболоид, т. е. обеспечить совпадение их осей, а также фокуса F_1 параболоида с фокусом F_2 гиперболоида. Для контроля юстировки воспользуемся, например, методом анаберрационных точек [6], применив вспомогательное плоское зеркало, конструктивно соединенное с гиперболоидом и обеспечивающее автоколлимационный ход лучей.

Распределение освещенности в фокальных линиях сопровождается дифракционными явлениями. В результате моделирования оптической системы телескопа с дополнительными коническими зеркалами получены изображения фокальных линий с учетом дифракции (профиль фокальной линии представлен на рис. 3), а также определены их сме-

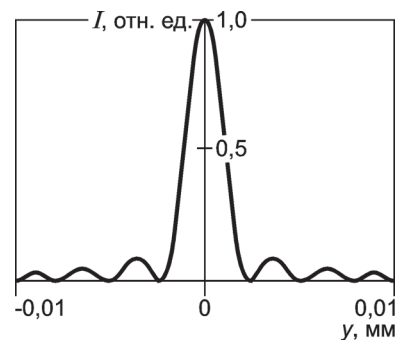


Рис. 3. Распределение интенсивности $I(y)$ в дифракционном изображении источника излучения