

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАДИОТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ С СОСТАВНЫМ СФЕРИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ ДИАМЕТРОМ 10 МЕТРОВ

В. В. Дружин, Д. Т. Пуряев

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Введение

Оптические и радиотелескопы космического базирования имеют важное значение в изучении космического пространства. Размеры главных зеркала этих телескопов достигают до 10 метров и являются составными. Это обусловлено габаритными требованиями для вывода телескопа на орбиту. Одним из примеров такого телескопа является радиотелескоп космической обсерватории «Миллиметрон» [1], главное зеркало которого имеет диаметр 10 метров, представляет параболическую форму и состоит из 72 сегментов. Весь телескоп построен по схеме Кассегрена и содержит вторичное гиперболическое зеркало диаметром 500 мм.

Важнейшей проблемой создания космических телескопов является проблема изготовления составных зеркал и их фазирование в условиях космоса, что, в свою очередь, ставит проблему выбора формы главного зеркала телескопа.

Очевидно, что сферическое составное зеркало дает неоспоримые преимущества перед аналогичным по размерам и назначению асферическим зеркалам любой формы, например, параболической или гиперболической, как с точки зрения технологии их изготовления, так и с точки зрения контроля качества и способов фазирования. Под термином фазирование мы понимаем установку сегментов составного зеркала в такое положение, при котором оно по оптическому действию адекватно монолитному зеркалу соответствующей формы.

Оптическая система радиотелескопа

В качестве альтернативной оптической системы телескопа «Миллиметрон» авторы предлагают оптическую систему объектива, состоящую из большого главного сферического зеркала М1 радиусом R и малого вторичного вогнутого зеркала М2 (рис. 1).

Главная особенность оптической системы заключается в том, что вершина вторичного зеркала совмещена с параксиальным фокусом главного сферического зеркала. Это дает возможность установить сферическое зеркало в позицию, защищающую приемную аппаратуру от нагревания прямыми солнечными лучами.

Уравнение профиля вторичного зеркала М2 в параметрическом виде (1), (2) было представлено в работе [2]:

$$Z = -R \frac{2(-4 \cos[\phi] + \cos[2\phi]) \sin\left[\frac{\phi}{2}\right]^4}{2 - 2 \cos[\phi] + \cos[2\phi]}, \quad (1)$$

$$Y = -R \frac{(3 - 6 \cos[\phi] + \cos[2\phi]) \sin\left[\frac{\phi}{2}\right]^2 \sin[\phi]}{2 - 2 \cos[\phi] + \cos[2\phi]}, \quad (2)$$

где R – радиус главного зеркала М1, ϕ – угол падения луча на сферическое зеркало.

Это уравнение получено на основе принципа Ферма, заключающемся в равенстве оптических путей для всех лучей, идущих от плоскости входного зрачка до фокуса F' системы.

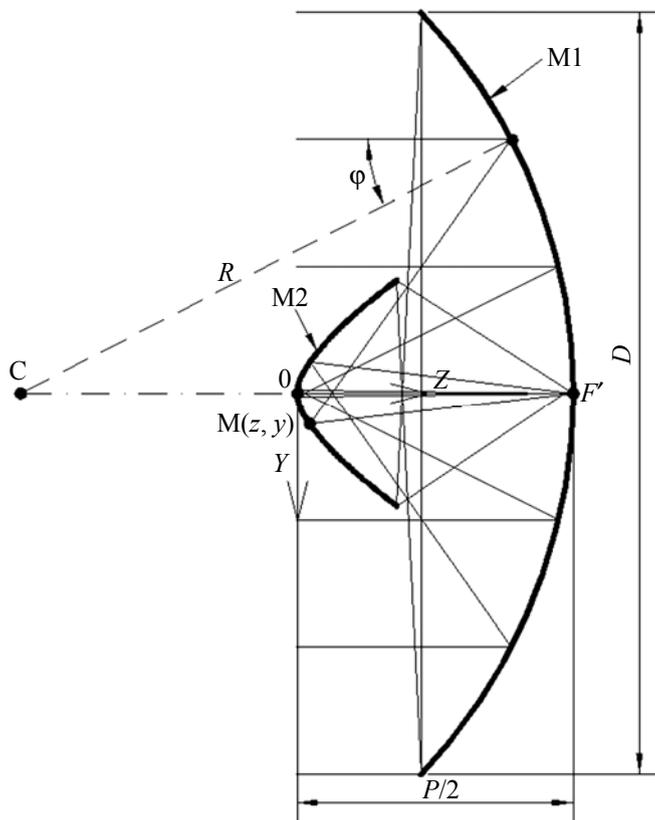


Рис. 1. Оптическая схема двухзеркального объектива

Входным зрачком системы является плоскость перпендикулярная оптической оси и проходящая через крайние точки светового диаметра сферического зеркала. Диаметр входного зрачка равен световому диаметру сферического зеркала для осевого пучка.

Прямое использование этого уравнения в программах расчета оптических систем связано с большими трудностями, так как поверхности, заданные параметрически, не входят в стандартные библиотеки известных авторов программ. Некоторые программы поддерживают интерполяцию кривой меридионального профиля по значениям, определенным в узловых точках. Такой подход связан с потерей точности, особенно при анализе наклонных пучков. В силу указанных причин возникает необходимость преобразования исходного уравнения к виду, удобному для расчета хода наклонных пучков. Цель дальнейших преобразований – получить в явном или неявном виде уравнение для расчета хода наклонных пучков или составления специальных UDS программ для описания пользовательских поверхностей [3].

В уравнениях (1) и (2) введем обозначения:

$$\cos[\phi] = t, \text{ тогда: } \sin[\phi] = \sqrt{1-t^2}, \quad \cos[2\phi] = 2t^2 - 1, \quad \sin\left[\frac{\phi}{2}\right] = \sqrt{\frac{1-t}{2}}.$$

В результате преобразований получим следующие параметрические уравнения профиля (t – параметр):

$$Z = -R \frac{(-1+t)^2 (-1-4t+2t^2)}{2-4t+4t^2}, \quad (3)$$

$$Y = -R \frac{(1-t)\sqrt{1-t^2}(1-3t+t^2)}{1-2t+2t^2}. \quad (4)$$

Исключая параметр t в (3), (4), можно получить уравнение профиля зеркала в неявной функции:

$$1024Y^8 - 64(27R^2 - 24RZ - 64Z^2)Y^6 + (-135R^4 - 720R^3Z - 4768R^2Z^2 + 3840RZ^3 + 6400Z^4)Y^4 + 8Z^2(-45R^4 - 14R^3Z - 772R^2Z^2 + 448RZ^3 + 576Z^4)Y^2 + 80Z^3(2R+Z)(R^2 + 2RZ - 4Z^2)^2 = 0. \quad (5)$$

Практический интерес представляет один из вещественных корней, представляет аналитическое уравнение профиля в форме $Y=f(Z)$:

$$Y = f(Z) = R \frac{(\sqrt{3}a_1 - 6a_2)\sqrt{-a_1^2 + 4\sqrt{3}a_1(2+a_2) - 12a_2(4+a_2)(-a_1^2 + 4\sqrt{3}a_1(-1+a_2) - 12(-4-2a_2+a_2^2))}}{96\sqrt{3}(a_1^2 - 4\sqrt{3}a_1(1+a_2) + 12(2+2a_2+a_2^2))}, \quad (6)$$

где

$$a_1 = \sqrt{\frac{2^{2/3}a^2 - 4a(-3+4Z) + 22^{1/3}(3+4Z)^2}{a}},$$

$$a_2 = \sqrt{2 - \frac{a}{62^{1/3}} - \frac{8Z}{3} + \frac{8\sqrt{3}Z}{a_1} - \frac{(3+4Z)^2}{32^{2/3}a}},$$

$$a = (-54 + \sqrt{k} + 1080Z - 576Z^2 + 128Z^3)^{\frac{1}{3}},$$

$$k = -139968Z + 1150848Z^2 - 1396224Z^3 + 470016Z^4 - 221184Z^5.$$

В результате уравнение поверхности вторичного зеркала M2 в системе координат $\{O, X, Y, Z\}$ может быть записано в виде:

$$F(X, Y, Z) = X^2 + Y^2 - (f(Z))^2 = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет применить стандартные методы расчета хода лучей через оптическую систему, например, по формулам формул Федера [4].

Анализ свойств оптической системы радиотелескопа

В качестве альтернативной системы авторы предлагают оптическую систему объектива, состоящую из большого главного сферического зеркала диаметром 10м, имеющего радиус $R = 7250$ мм. Расстояние d между главным и сферическим зеркалом выбрано таким образом, что вершина вторичного зеркала совпадает с паракиальным фокусом главного зеркала, т. е. $d = R/2$. Радиус сферического зеркала и габаритные параметры оптической системы выбраны из соображений компактности телескопа вдоль оптической оси таким образом, чтобы прямые лучи не попадали на отражающую поверхность вторичного зеркала. Лучи света, отражающиеся от верхнего края сферического зеркала, поступают на нижний край вторичного зеркала и далее фокусируются в вершине главного зеркала. Авторами был реализован алгоритм расчета хода реальных лучей в математическом пакете САПР Mathematica Wolfram, были проведены контрольные расчеты осевого пучка реальных лучей, подтверждающие полное отсутствие сферической аберрации системы.

Для анализа структуры изображения произведен расчет хода наклонных пучков, получены точечные диаграммы (рис. 2), представляющие совокупность точек пересечения с плоскостью изображения лучей, проходящих через центры равновеликих ячеек входного зрачка. Из полученных

диаграмм, представленных на рис. 2,б видно, что для наклонного пучка лучей 10^{-4} радиан, соответствующему $20,6''$, геометрический размер пятна рассеяния в фокальной плоскости имеет диаметр 16,7 мм. Среднеквадратические размеры пятна рассеяния для этого наклона составляют 2,38 мм, что представляет собой 5,27 диаметров кружка Эйри, равному 451,379 мкм для длины волны 0,2 мм. Полученное угловое поле по сравнению с радиотелескопом «Миллиметрон» существенно меньше, что является недостатком предложенной системы. Однако, этот недостаток компенсируется применением составного сферического зеркала вместо сосравнго параболического зеркала такого же диаметра. Следует отметить, что угловое поле предложенного телескопа можно увеличить за счет применения сканирования поля зрения с помощью сканирования телескопом или вторичным зеркалом.

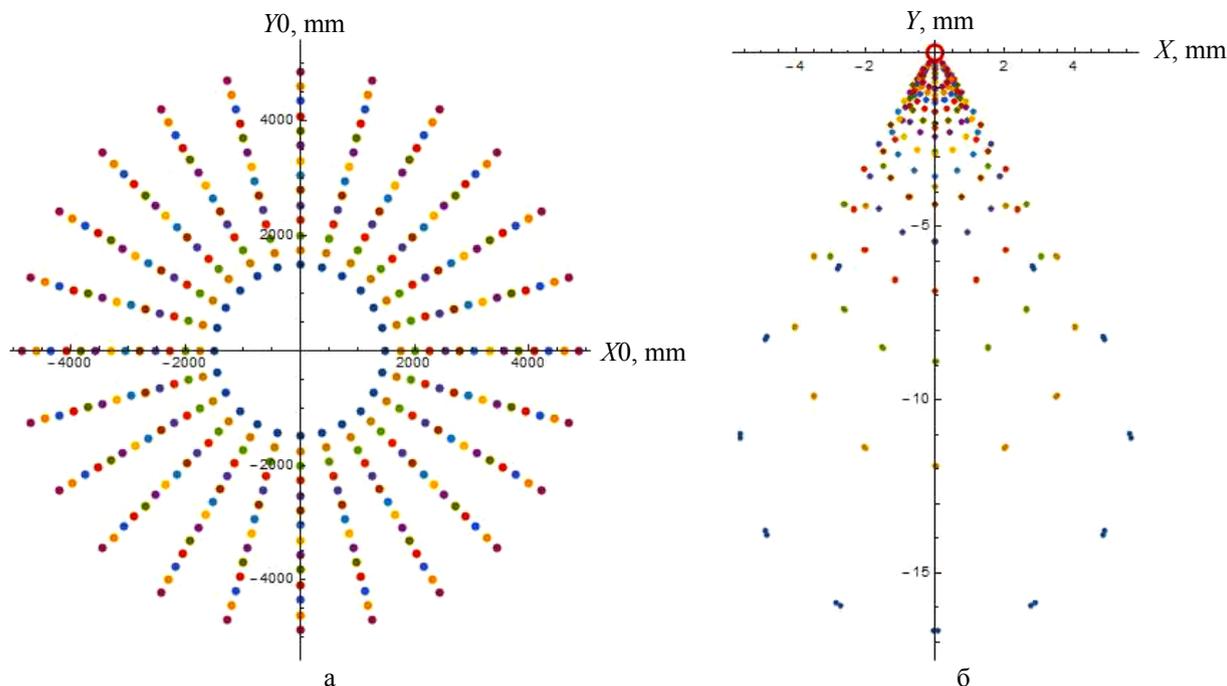


Рис. 2. Распределение лучей во входном зрачке (а), в фокальной плоскости (б)

Вывод

Предлагаемая оптическая система двухзеркального телескопа со сферическим главным зеркалом, выполняющего роль объектива телескопа, может рассматриваться как альтернативная оптической системе радиотелескопа с главным параболическим зеркалом диаметром 10 метров.

Список литературы

1. Кардашев Н. С., Новиков И. Д. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон. УФН. 2014. 184. С. 1319–1352.
2. Puryayev D. T., Gontcharov A. V. Compact two-mirror schemes for telescopes with a fast spherical primary, Opt. Eng. 39(6), 1692–1696 (Jun 01, 2000). ; <http://dx.doi.org/10.1117/1.602546>
3. Nicholson M. How to Compile a User-Defined Surface (2005), <http://www.zemax.com/os/resource-center/learn/knowledgebase/how-to-compile-a-user-defined-surface>
4. Feder D. P. Optical Calculations with Automatic Computing Machinery. – Journ. Opt. Soc. of America. 1951. Vol. 41, N 9, p. 630.