

## Моделирование процесса адаптации космического телескопа «Миллиметрон»

### Modeling of the “Millimetron” space telescope alignment

#### Дубрович / Dubrovich V.

Виктор Константинович

(viktor.dubrovich@scaegroup.com)

доктор физико-математических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
и.о. зав. отдела ВЭД.

г. Санкт-Петербург

#### Заика / Zaika D.

Дмитрий Юрьевич

(dmitry.zaika@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-программист.

г. Санкт-Петербург

#### Качурин / Kachurin V.

Владимир Константинович

(vladimir.kachurin@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
младший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

#### Цема / Tsema G.

Григорий Сергеевич

(grigoriy.tsema@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер.

г. Санкт-Петербург

#### Щесняк / Shchesnyak S.

Сергей Степанович

(sergey.schesnyak@scaegroup.com)

доктор технических наук, профессор.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** космический телескоп – space telescope; главное зеркало – primary specula; центральное зеркало – central specula; вторичное зеркало или контррефлектор – secondary specula.

В статье рассмотрена методика адаптации космического телескопа «Миллиметрон», основанная на анализе изображения фокального пятна. Электродинамические расчеты параметров фокального пятна выполнены в приближении физической оптики для видимого диапазона длин волн ( $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ ), что позволило увеличить точность установки элементов космического телескопа.

The article deals with the technique of adapting space telescope “Millimetron”, based on the analysis of the image focal spots. Electrodynamical calculation of the parameters of the focal spot is made in the physical optics approximation for visible wavelengths ( $\lambda = 0,65 \text{ }\mu\text{m}$ ), which increased accuracy of installation of elements of the space telescope.

Космический телескоп «Миллиметрон» представляет собой двухзеркальный телескоп, выполненный по схеме Кассегрена. Оптическая схема телескопа представлена на рис. 1. Главное зеркало параболическое, диаметром 10 м состоит из центрального зеркала (ЦЗ)

и 72 панелей. Контррефлектор (КР) – гиперболическое зеркало.

Для нормальной работы телескопа необходимо периодически контролировать взаимное расположение его отдельных частей [1–3]. Наиболее простым и надежным методом контроля является амплитудный метод. В работе предлагается метод адаптации телескопа по геометрическим свойствам (см. [4]) фокального пятна, как в первичном, так и во вторичном фокусах.

Предполагается, что перед началом процесса адаптации навигационная аппаратура совмещает ось ЦЗ с направлением на удаленный источник излучения. Сам процесс адаптации проходит в три этапа.

Первый этап: совмещение первичного фокуса КР с фокусом ЦЗ.

Второй этап: совмещение осей ЦЗ и КР.

Третий этап: установка панелей главного зеркала.

**Первый этап.** Для работы в первичном фокусе в вершине КР вырезано отверстие, а в первичном фокусе расположена приемная матрица. От удаленного источника излучение падает на главное зеркало телескопа. Отраженное от главного зеркала излучение частично проходит через отверстие в вершине КР и попадает на приемную матрицу, расположенную в первичном фокусе КР. Излучение, прошедшее через отверстие, регистрируется приемной матрицей, которая жестко

связана с КР и при сдвигах и поворотах последнего тоже меняет свое положение. Центр матрицы совмещен с первичным фокусом КР. В случае совмещения первичного фокуса КР и фокуса ЦЗ фокальное пятно окажется точно в центре приемной матрицы. Двигая КР в направлении перпендикулярном оси ЦЗ, можно вывести фокальное пятно в центр матрицы, находящейся в первичном фокусе. Движением КР вдоль оси ЦЗ можно найти положение КР, при котором достигается абсолютный максимум интенсивности в изображении. Найденное таким образом положение КР соответствует искомому положению с совмещенными фокусами ЦЗ и КР. Ниже (рис. 2) приведены результаты расчетов максимальной плотности потока мощности на приемной матрице от расстояния до фокуса ЦЗ. Расчеты проводились в приближении физической оптики для длины волны  $\lambda = 0,65$  мкм и радиуса отверстия в вершине КР 25 мм. Ось ОХ – расстояние до фокуса в мкм, ось ОУ – плотность потока энергии в относительных единицах.

Убывание плотности потока энергии на 20 % происходит на расстоянии  $\sim 10$  мкм. Эта величина является оценкой точности установки КР вдоль оси ЦЗ. Точность установки в направлении перпендикулярном оси ЦЗ определяется размерами пикселя приемной матрицы.

**Второй этап.** Расчеты фокального пятна в главном фокусе телескопа показали, что поворот КР вокруг оси, проходящей через первичный фокус КР, очень

мало изменяют структуру пятна, а только сдвигают его центр. По величине сдвига определяется наклон КР, и производится его установка. Для установки КР по углу необходимо минимизировать вклад панелей главного зеркала в фокальное пятно. Для этого панели устанавливаются так, чтобы «зайчики» от них не попадали на центральное пятно. Таким образом, для совмещения осей КР и ЦЗ достаточно развести панели так, чтобы они не влияли на центральное пятно, и установить это пятно в центр матрицы.

**Третий этап.** На третьем этапе производится установка панелей. На рис. 3 изображено фокальное пятно перед началом установки панелей. Центральное пятно сформировано ЦЗ. Вокруг него видны более слабые пятна, сформированные панелями главного зеркала. Для установки панели по углу необходимо панель развернуть на небольшой угол и путем вычитания двух изображений до и после поворота выделить «зайчик» от данной панели. Затем по положению «зайчика» на изображении вычисляется поворот, на который необходимо повернуть панель.

На практике оказалось, что образец ЦЗ имеет существенные по сравнению с длиной волны неровности. Ниже кратко представлены результаты исследований опытного образца фрагмента параболического зеркала размером  $20 \times 20$  см. На образце имеются нерегулярные неровности, которые хорошо видны при облучении образца плоской волной и съемке отраженного света

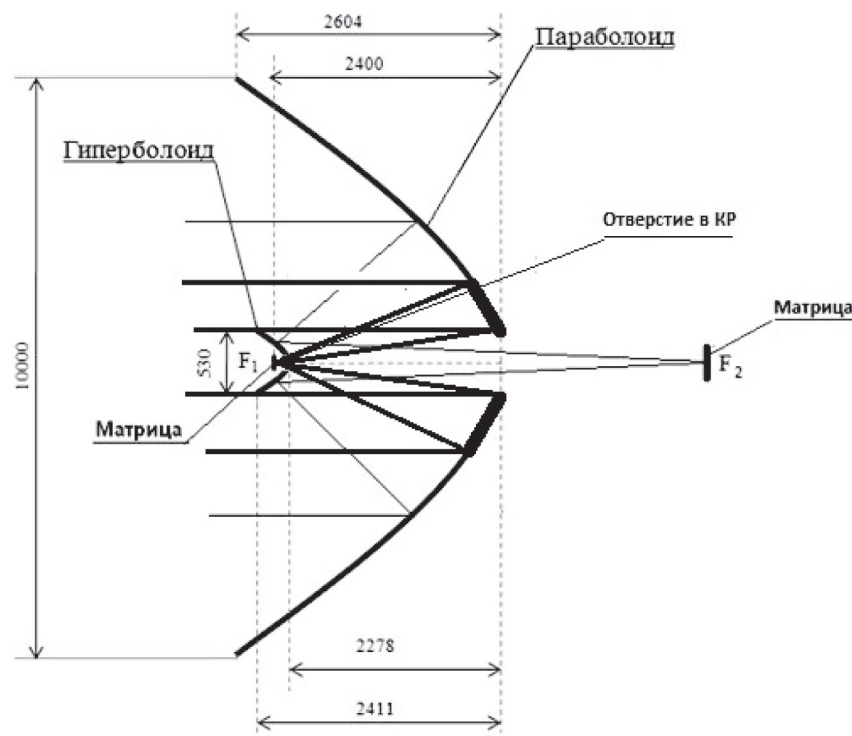


Рис. 1. Оптическая схема телескопа «Миллиметр»



Рис. 2. Зависимость максимума плотности потока энергии от сдвига приемной матрицы

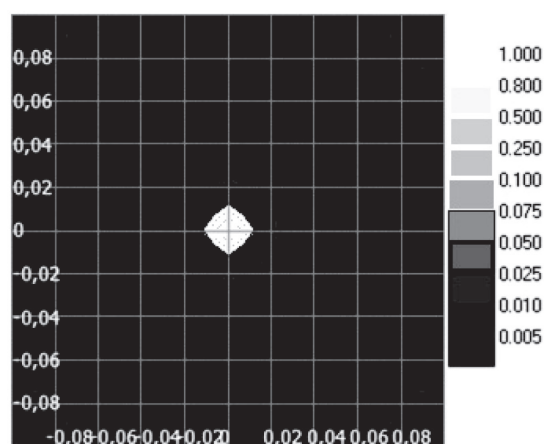


Рис. 3. Дифракционное пятно при больших отклонениях панелей от оптимального положения

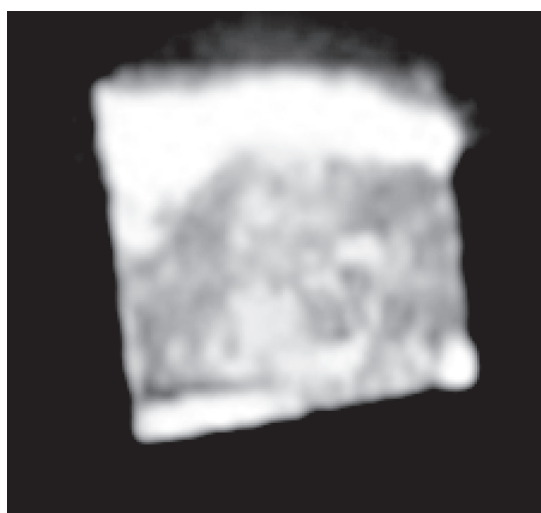


Рис. 4. Нерегулярные неровности образца зеркала



Рис. 5. График разреза фокального пятна

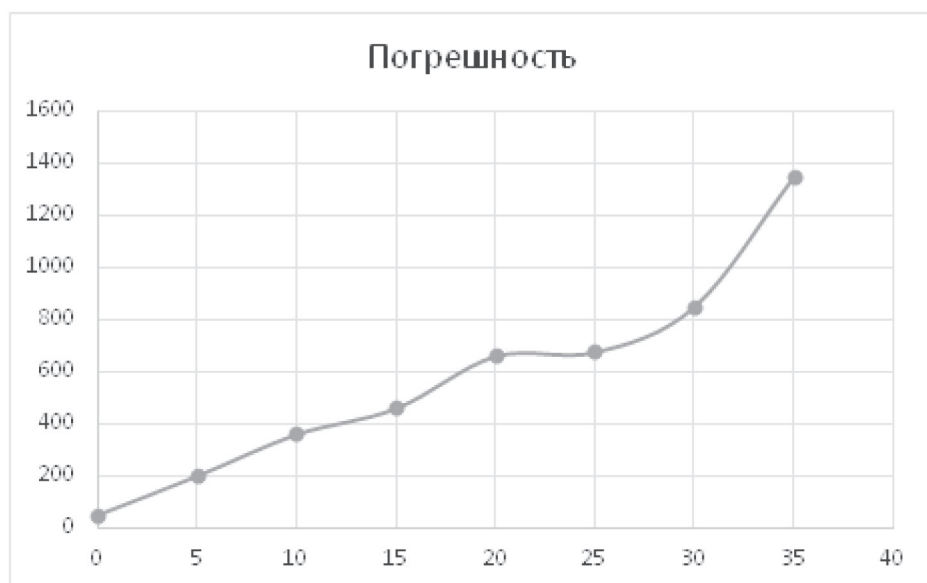


Рис. 6. Погрешность установки КР в зависимости от максимального угла отклонения фацетов.  
Ось ОХ — максимальный угол отклонения фацетов в угловых секундах,  
ось ОУ — оценка погрешности установки КР в мкм

через объектив, установленный в фокальном пятне. Рис. 4 демонстрирует такой снимок.

На рис. 5 представлен график разреза фокального пятна от коллимированного пучка света, сформированного опытным образцом фрагмента зеркала. Длина волны источника 0,65 мкм, размеры панели приблизительно 20×20 см. На графике по оси ОХ – расстояние в пикселях, размер пикселя – 4,3 мкм.

Как видно из рис. 5, размеры реального пятна значительно превосходят размеры пятна Эйри, что связано с неровностями зеркала. Для полученного образца фактические отклонения от параболы составляют ~ 15–20 мкм.

Рассмотрена фасеточная модель зеркала, то есть каждая панель, и ЦЗ считается состоящий из отдельных кусков параболоида, но ориентированных случайным образом в некотором конусе углов поворота. Продольный масштаб фасетов и максимальный угол их отклонения являются свободными параметрами задачи.

В случае фасеточной модели на первом этапе установка КР вдоль оси ЦЗ производится по критерию минимальной ширины пучка [5]. На рис. 6 изображен график погрешности установки КР вдоль оси ЦЗ от максимального угла отклонения фасетов. Ось ОХ – максимальный угол отклонения фасетов, ось ОУ оценка погрешности установки КР.

Второй этап остается без изменений.

Для модификации третьего этапа установки с учетом неровностей главного зеркала была разработана компьютерная программа расчета электромагнитного поля в окрестности главного фокуса телескопа. В модели на ЦЗ и на каждой панели задается массив фасетов со случайными координатами, случайным углом отклонения нормали фасета от нормали к идеальному параболоиду и случайной площадью. Количество фасетов на каждом элементе главного зеркала определяется площадью этого элемента и средним размером фасета. Обозначим значения, снимаемые с приемной матрицы  $B_{cr}$ , где  $c$  – номер столбца,  $r$  – номер строки. В качестве характеристик изображения рассматриваются моменты изображения:

$$\langle B \rangle = \sum_{c,r} B_{cr}$$

$$X = \sum_{c,r} \frac{cB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$Y = \sum_{c,r} \frac{rB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$XX = \sum_{c,r} \frac{c^2 B_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$XY = \sum_{c,r} \frac{crB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$YY = \sum_{c,r} \frac{r^2 B_{cr}}{\langle B \rangle}$$

Нулевой момент  $\langle B \rangle$  является нормировочным множителем и пропорционален энергии излучения, падающего на приемную матрицу.  $X$  и  $Y$  имеют смысл координат центра пятна,  $XX$  и  $YY$  определяют эффективный размер пятна по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Наряду с моментами изображения рассматриваются моменты разности изображений. Разности изображений соответствует массив чисел, определенный как

$$D_{cr} = B_{cr}^{(1)} - B_{cr}^{(2)},$$

где  $B_{cr}^{(1)}$  и  $B_{cr}^{(2)}$  – два изображения.

Массив разности изображений удобно разбить на отрицательную и положительную части  $D^+$  и  $D^-$ :

$$D_{cr}^+ = D_{cr} \text{ при } D_{cr} > 0;$$

$$D_{cr}^- = -D_{cr} \text{ при } D_{cr} < 0.$$

Для отрицательной и положительной частей определяются моменты так же, как для изображения. При движении панели характеристики разности изображений качественно повторяет динамику характеристик пятна, сформированного одной движущейся панелью.

## Заключение

В статье рассмотрена оригинальная методика адаптации отражателей телескопа "Миллиметр", которая позволяет производить юстировку элементов антенны по свойствам пятен как в первичном, так и во вторичном фокусах, используя излучение удаленной звезды в оптическом диапазоне. Проведено обоснование метода установки панелей по разности изображений. Проведенные вычисления позволяют применять разность изображений для адаптации положения панелей. Показано, что излучение удаленной звезды в оптическом диапазоне может быть использовано для достаточно точной юстировки элементов радиотелескопа.

## Литература

1. Noethe, L. Active optics in modern large optical telescopes / L. Noethe // Progress in optics. – 2002. – Vol. 43. – P. 1–70.
2. The Giant Magellan Telescope active optics system / B. McLeod [et al.] // Mirror (FSM). – 2014. – Vol. 4. – P. 5.
3. Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance / M. Laslandes [et al.] // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52, No. 9. – P. 091803.
4. Teague, M. R. Image analysis via the general theory of moments / M.R. Teague // JOSA. – 1980. – Vol. 70, No. 8. – P. 920–930.
5. Тараненко, В. Г. Адаптивная оптика / В.Г. Тараненко, О.И. Шанин. – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.