

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

© 2009 г. А. М. Савицкий

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

На примере космического телескопа, построенного по схеме Ричи–Кретьена с линзовым корректором, рассматриваются температурные параметры элементов конструкции телескопа, влияющие на пространственное положение оптических компонентов. Приводятся принципы построения корректирующих систем и результат конкретной реализации системы обеспечения температурного режима.

*Ключевые слова:* космические телескопы, тепловой режим телескопа.

Коды OCIS: 350. 6090.

*Поступила в редакцию 25.06.2009.*

### Введение

К современным крупногабаритным космическим телескопам для оптико-электронных камер, предназначенных для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), предъявляются крайне высокие требования к качеству изображения: среднеквадратическая деформация волнового фронта ( $W_{\text{СКВ}}$ ) на орбите не должна превышать  $0,1\lambda$ , где  $\lambda = 0,6328$  мкм. Существует целый ряд дестабилизирующих факторов, воздействующих на телескоп и снижающих качество изображения. Наиболее существенными из них являются [1, 2]: силовые и вибрационные воздействия на телескоп на этапе его вывода на орбиту, перераспределение напряжений и деформаций конструкции, обусловленных переходом от сил тяготения в наземных условиях к отсутствию сил тяжести на орбите; ионизирующее излучение естественных радиационных поясов Земли, изменение температуры и температурные перепады на элементах конструкции, вызывающие термодформации [3, 4]. Дестабилизирующие факторы приводят к смещениям и наклонам оптических компонентов, что вызывает снижение качества изображения. Для минимизации и исключения погрешности взаимного расположения оптических компонентов в телескопах предусматриваются системы автоматической фокусировки (САФ) и юстировки (САЮ). Эти системы предназначены для измерения децентрировок компонентов (смещений, наклонов) и их коррекции.

Одним из наиболее существенных дестабилизирующих факторов являются температурные возмущения, вызывающие термодформации конструкции телескопа и его элементов. Для уменьшения влияния температурных возмущений предусматривается система обеспечения температурного режима (СОТР), представляющая собой комплекс радиационных панелей, электронагревателей, управляющих термодатчиков, тепловых труб, термоизоляционных покрытий и др.

В настоящей статье на основе опыта создания на “ЛОМО” крупногабаритных космических телескопов рассматриваются температурные параметры элементов конструкции телескопа, влияющие на пространственное положение оптических компонентов.

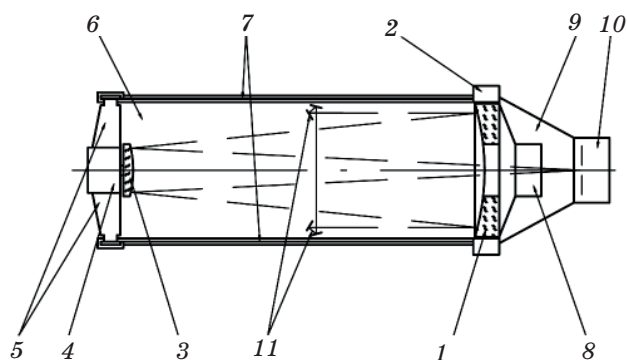
### Оптическая и конструктивная схемы крупногабаритных телескопов

Оптическая система крупногабаритных космических телескопов с диаметром входного зрачка – диаметром главного зеркала (ГЗ) – более 1 м обычно строится по схеме Ричи–Кретьена, состоящей из гиперболических ГЗ и вторичного зеркала (ВЗ), а также линзового корректора полевых аберраций (КПА). Конструктивно схема выполнена таким образом, что ГЗ, КПА и фокальный узел расположены вблизи друг от друга и составляют единый нерасстраиваемый оптико-механический модуль. Поскольку ВЗ удалено от ГЗ, оно требует постоянного контроля за его положением относительно оптической оси ГЗ.

Конструктивно телескоп (рис. 1) состоит из главного зеркала 1, закрепленного в оправе 2, являющейся одновременно основным силовым элементом – опорным шпангоутом телескопа, с помощью которого осуществляется его стыковка с космическим аппаратом КА. Вторичное зеркало 3, установленное на узле приводов вторичного зеркала 4, при помощи четырех растяжек 5 закреплено на несущей конструкции телескопа 6. Несущая конструкция телескопа (НКТ) выполнена в виде цилиндрической оболочки, один из фланцев которой прикреплен к опорному шпангоуту, а второй является местом установки узла ВЗ. При этом для обеспечения заданного расстояния между ГЗ и ВЗ вдоль НКТ установлены четыре инваровых стержня 7, одни концы которых жестко закреплены на опорном шпангоуте, а вторые крепятся к специальным кареткам, которые обеспечивают возможность их свободного перемещения вдоль продольной оси НКТ.

Крепление растяжек узла ВЗ осуществляется непосредственно к кареткам, чем и обеспечивается неизменность расстояния между ГЗ и ВЗ.

С тыльной стороны опорного шпангоута установлен линзовый корректор 8 для исправления полевых aberrаций. С той же стороны установлен приборный отсек 9 и закрепленный на нем фокальный узел с приемниками изображений 10. На внутренней поверхности НКТ установлены два световозвращателя 11 системы автоматической фокусировки.



**Рис. 1.** Конструктивная схема телескопа. 1 – главное зеркало, 2 – оправа главного зеркала, 3 – вторичное зеркало, 4 – приводы вторичного зеркала, 5 – растяжки, 6 – несущая конструкция телескопа, 7 – инваровые стержни, 8 – линзовый корректор, 9 – приборный отсек, 10 – приемник изображения, 11 – световозвращатели.

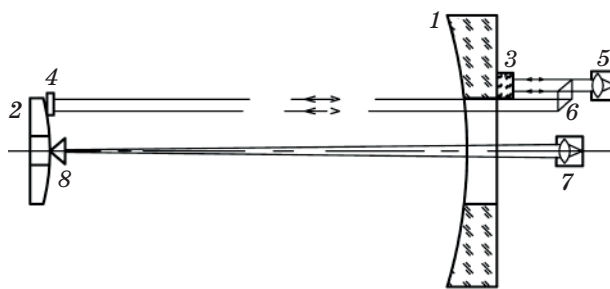
## Системы автоматической юстировки и фокусировки

Возможные варианты построения САЮ и САФ приведены в статье [1].

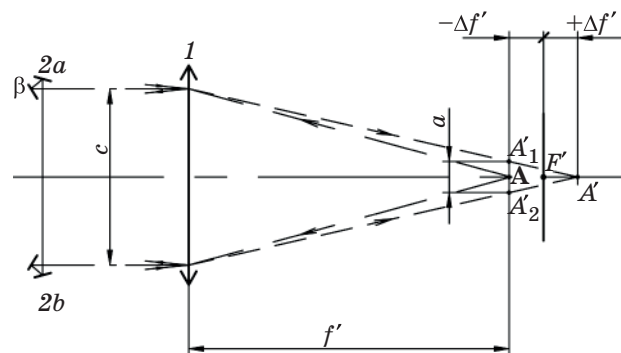
Алгоритм работы систем заключается в том, что перед каждым сеансом наблюдения проводятся измерение пространственного положения оптических компонентов телескопа и на основании этого перемещение корректирующего элемента оптической системы, в данном случае ВЗ.

Принцип работы измерительной системы САЮ показан на рис. 2.

На тыльной поверхности ГЗ (1) установлено контрольное плоское зеркало 3, а на ВЗ (2) – контрольное зеркало 4. Автоколлиматор 5 через зеркальный ромб 6 принимает одновременно автоколлимацию от зеркал 3 и 4, измеряя углы заклона ВЗ относительно ГЗ. Поперечное смещение ВЗ перпендикулярно оптической оси измеряется с помощью автоколлимационного микроскопа 7 и трипель-призмы 8, установленной на ВЗ.



**Рис. 2.** Система автоматической юстировки. 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 и 4 – контрольные плоские зеркала, 5 – автоколлиматор, 6 – зеркальный ромб, 7 – автоколлимационный микроскоп, 8 – трипель-призма.



**Рис. 3.** Система автоматической фокусировки. 1 – объектив, 2а, 2б – пентагональные отражатели; А – марка, установленная в фокальной плоскости объектива.

Принципиальная оптическая схема САФ объектива показана на рис. 3.

В фокальной плоскости объектива 1 устанавливается марка А. В параллельном ходе лучей перед объективом устанавливаются два пентагональных отражателя 2а, 2b световозвращателя САФ, выполненные в виде базовой кварцевой пластины, к которой прикреплены плоскопараллельные пластины под углом 45° друг к другу. При смещении фокальной плоскости относительно марки А на  $\Delta f'$  ее изображениями при прохождении световых лучей через пентагональные

отражатели 2а и 2b являются  $A'_1$  и  $A'_2$ , расстояния между которыми обозначим через  $a$ . Тогда  $\Delta f' = af'/c$ . Величина  $a$  – измеряется, и в случае  $a = 0$  дефокусировка системы отсутствует.

### Температурные параметры элементов конструкции телескопа

Рассмотрим основные элементы конструкции и их температурные параметры (см. таблицу). Важная задача СОТР на участках наблюдения объекта, когда не задействованы САЮ и САФ, –

Температурные параметры элементов конструкции телескопа

Элемент конструкции	Параметр температурного режима	Обозначение	Связь со смещениями и наклонами оптического компонента
Несущая конструкция телескопа (НКТ)	Диапазон изменения температуры	$\Delta t_1^{\text{НКТ}}$	Компенсация САФ
	Разность средних температур диаметрально расположенных инваровых стержней	$\Delta t_2^{\text{НКТ}}$	Компенсация САЮ
	Средний диаметральный перепад температур на оболочке	$\Delta t_3^{\text{НКТ}}$	Компенсация САЮ
	Изменение средней температуры инваровых стержней за время наблюдения	$\Delta t_4^{\text{НКТ}}$	$\Delta f^{\text{НКТ}} = k\alpha_{\text{и}}L_{\text{и}}\Delta t_4^{\text{НКТ}}$
	Изменение разности средних температур диаметрально расположенных стержней за время наблюдения	$\Delta t_5^{\text{НКТ}}$	$\Delta \varphi^{\text{НКТ}} = \frac{\alpha_{\text{и}}L_{\text{и}}^2\Delta t_5^{\text{НКТ}}}{4,85 \times 10^{-6} B}$
	Изменение среднего диаметрального перепада на оболочке за время наблюдения	$\Delta t_6^{\text{НКТ}}$	$\Delta h^{\text{НКТ}} = \frac{\alpha_{\text{т}}A^2\Delta t_6^{\text{НКТ}}}{2D}$
Приборный отсек (ПО)	Диапазон изменения температуры	$\Delta t_1^{\text{ПО}}$	Компенсация САФ
	Средний диаметральный перепад температуры на корпусе	$\Delta t_2^{\text{ПО}}$	$\Delta f_1^{\text{ПО}} = \frac{\alpha_{\text{т}}L_{\text{ши}}L_{\text{по}}\Delta t_2^{\text{ПО}}}{2D_{\text{по}}}$
	Изменение средней температуры корпуса за время наблюдения	$\Delta t_3^{\text{ПО}}$	$\Delta f_2^{\text{ПО}} = \alpha_{\text{т}}L_{\text{по}}\Delta t_3^{\text{ПО}}$
Узел вторичного зеркала (ВЗ) с растяжками	Диапазон изменения температуры	$\Delta t_1^{\text{ВЗ}}$	Компенсация САЮ
	Разность средних температур диаметрально расположенных растяжек	$\Delta t_2^{\text{ВЗ}}$	Компенсация САЮ
	Изменение средней температуры корпуса ВЗ с растяжками во время наблюдения	$\Delta t_3^{\text{ВЗ}}$	$\Delta f^{\text{ВЗ}} = 0,5[\alpha_{\text{ст}} - \alpha_{\text{т}}]L_{\text{к}}\Delta t_3^{\text{ВЗ}} K$
	Изменение разности средних температур диаметрально расположенных растяжек за время наблюдения	$\Delta t_4^{\text{ВЗ}}$	$\Delta h^{\text{ВЗ}} = \alpha_{\text{т}}L_{\text{р}}\Delta t_4^{\text{ВЗ}}$
Световозвращатель САФ	Максимальный перепад температур на базовой пластине вдоль направления, перпендикулярного биссектрисе угла между зеркалами	$\Delta t_x^{\text{CB}}$	$\Delta f^{\text{CB}} = 2\sqrt{2} \frac{\alpha_{\text{к}}^* (f')^2}{2} \times \left( \frac{1 + \sqrt{2}}{2} \frac{l_1}{l_2} \Delta t_y^{\text{CB}} + \Delta t_x^{\text{CB}} \right)$
	Максимальный перепад температур на базовой пластине световозвращателя вдоль биссектрисы угла между зеркалами	$\Delta t_y^{\text{CB}}$	

\*  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент линейного расширения кварцевого стекла.



кулярных оптической оси,  $\Delta\varphi_{\Sigma}$  можно оценить по формулам

$$\Delta f_{\Sigma} = \left[ \Delta f_0^2 + (\Delta f^{\text{НКТ}})^2 + (\Delta f_1^{\text{ПО}})^2 + (\Delta f_2^{\text{ПО}})^2 + (\Delta f^{\text{ВЗ}})^2 + (\Delta f^{\text{СВ}})^2 \right]^{1/2},$$

$$\Delta h_{\Sigma} = \left[ \Delta h_0^2 + (\Delta h^{\text{НКТ}})^2 + (\Delta h^{\text{ВЗ}})^2 \right]^{1/2},$$

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \left[ \Delta\varphi_0^2 + (\Delta\varphi^{\text{НКТ}})^2 \right]^{1/2},$$

где  $\Delta f_0$ ,  $\Delta h_0$  и  $\Delta\varphi_0$  – параметры, определяемые собственными погрешностями САФ и САЮ.

### Результаты оценки допустимых значений температурных параметров

Суммарные значения  $\Delta f_{\Sigma}$ ,  $\Delta h_{\Sigma}$ ,  $\Delta\varphi_{\Sigma}$  не должны превышать допустимых значений, устанавливаемых из критериев качества изображения. В частности, для космического телескопа, разработанного и изготовленного на “ЛОМО”, с  $D_{ГЗ} = 1,5$  м допустимые значения составляют:  $\Delta f_{\Sigma} = 0,15$  мм,  $\Delta h_{\Sigma} = 0,05$  мм,  $\Delta\varphi_{\Sigma} = 5''$ .

Исходя из допустимых значений рассмотренных параметров в соответствии с приведенными выше формулами получены следующие допустимые значения температур:

$$\Delta t_1^{\text{НКТ}} = (12 - 28)^{\circ}\text{C}, \Delta t_1^{\text{ПО}} = (8 - 35)^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta t_1^{\text{ВЗ}} = (12 - 35)^{\circ}\text{C}, \Delta t_y^{\text{СВ}} = 0,11 \text{ К},$$

$$\Delta t_2^{\text{НКТ}} = 3,8 \text{ К}, \Delta t_2^{\text{ПО}} = 6 \text{ К}, \Delta t_2^{\text{ВЗ}} = 3,5 \text{ К},$$

$$\Delta t_x^{\text{СВ}} = 0,23 \text{ К},$$

$$\Delta t_3^{\text{НКТ}} = 2,6 \text{ К}, \Delta t_3^{\text{ПО}} = 4 \text{ К}, \Delta t_3^{\text{ВЗ}} = 3 \text{ К},$$

$$\Delta t_4^{\text{НКТ}} = 2,2 \text{ К}, \Delta t_4^{\text{ВЗ}} = 4 \text{ К},$$

$$\Delta t_5^{\text{НКТ}} = 1,8 \text{ К},$$

$$\Delta t_6^{\text{НКТ}} = 1,8 \text{ К}.$$

### Заключение

Для обеспечения качественных характеристик крупногабаритных космических телескопов желательное введение в их конструкцию служебных систем САЮ и САФ, позволяющих проводить корректировку взаимного положения оптических компонентов телескопа перед наблюдением при его эксплуатации в составе КА.

В процессе наблюдения, когда задействование систем САЮ и САФ невозможно, качество оптической системы будет определяться изменением температурных параметров на ее конструктивных элементах. Допустимые значения этих параметров выдвигают требования к техническим характеристикам СОТР КА, обеспечивающей тепловой режим телескопа. При этом необходимо отметить, что, кроме взаимного положения оптических элементов, на качество изображения будут влиять искажения отражающих и преломляющих поверхностей оптических элементов объектива из-за возникающих в них температурных деформаций.

Комплексный подход при назначении параметров СОТР КА, технических характеристик САЮ и САФ позволит обеспечить требуемый температурный режим телескопа, а следовательно, и его качественные характеристики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А., Лысенко А.И., Маламед Е.Р., Сокольский М.Н. Служебные системы космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 36–44.
1. Гоголев Ю.А., Зверев В.А., Пожинская И.И., Соболев К.Ю. Анализ основных проблем создания оптики крупных телескопов // Оптический журнал. 1996. № 4. С. 16–32.
1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под редакцией Г.П. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
1. Блох А.Г., Журавлев А.Г., Рынсков Л.Н. Теплообмен излучения. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.