
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.373.526

Ю. В. БАЁВА, А. В. ДЕМИН, С. И. ХАНКОВ, С. И. ЖУКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ТЕРМОАБЕРРАЦИЙ МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

Представлена методика расчета теплового режима и термонаведенных aberrаций оптико-электронной системы дистанционного зондирования Земли из космоса. Показано, что в пределах циклограммы функционирования приращения температур элементов телескопа и изменения термонаведенных aberrаций прямопропорциональны времени рабочего режима; при выбранной тепломеханической схеме обеспечивается термостабильность системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронные системы, микроспутник, тепловой режим, термоабerrация.

Одно из перспективных направлений развития космических систем дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) — разработка оптико-электронных систем (ОЭС) для микроспутников массой не более 100 кг. Такие ОЭС могут выводиться на орбиту как сопутствующие основному объекту на носителе, что снижает стоимость запуска и обслуживания. Наиболее рационально выводить на орбиту несколько ОЭС для микроспутников (МС), что позволяет посредством особого их расположения обеспечить большую зону обзора. Недостаточно высокое линейное разрешение ОЭС на местности может компенсироваться функционированием МС на более низких орбитах. Для обеспечения термостабильности подобных систем необходимо искать схемотехническое решение, позволяющее достичь требуемых параметров. Это объясняется тем, что создание системы автоматической фокусировки для подобных ОЭС экономически нецелесообразно ввиду малых массогабаритных характеристик и ограничений по энергетическим параметрам на МС.

Цель настоящей статьи — исследование теплового режима и термоабerrаций объектива ОЭС ДЗЗ, базирующейся на МС в условиях открытого космоса, для определения возможности обеспечения ее термостабильности при следующих исходных данных: температура в местах крепления ОЭС к платформе МС — 0...35 °С; съемка при углах разворота МС относительно надира по углам крена и тангажа — до $\pm 30^\circ$; высотный угол Солнца при съемке — 5...90°; время непрерывной съемки — 10 мин; среднее значение высоты орбиты МС — 600 км; рабочий спектральный диапазон — 0,41...0,95 мкм.

Объект исследования. Общий вид ОЭС, построенной по схеме Ричи — Кретьена, приведен на рис. 1, где 1 — светозащитная крышка; 2 — объектив; 3 — система приема и преобразования информации. Основанием конструкции является титановая платформа, установленная на МС. К платформе крепятся линзовый корректор с главным зеркалом и

цилиндрический корпус, на противоположном конце которого на пилонах установлен стакан с вторичным зеркалом.

Нормальное положение плоскости наилучшего изображения (допустимое смещение ± 5 мкм) обеспечивается при температуре 20 ± 5 °С. Компенсация процесса выхолаживания ОЭС ниже заданных параметров обеспечивается за счет применения нагревателей, температура которых регулируется блоком управления по информации от термодатчиков. Нагреватели и термодатчики расположены внутри корпуса объектива и на платформе МС.

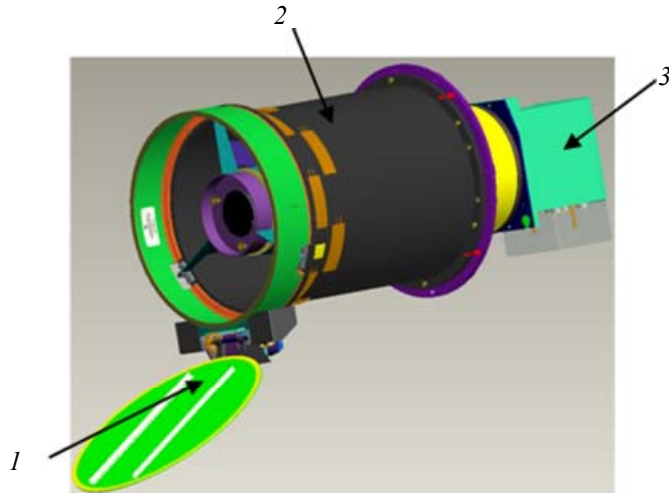


Рис. 1

Тепловая и математическая модели. Конструктивная модель объектива ОЭС приведена на рис. 2, где 1 — главное зеркало; 2 — вторичное зеркало (поверхности зеркал 1 и 2 — гиперboloиды вращения); 3 — корпус объектива; 4 — платформа МС, на которую крепится ОЭС; 5 — экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ).

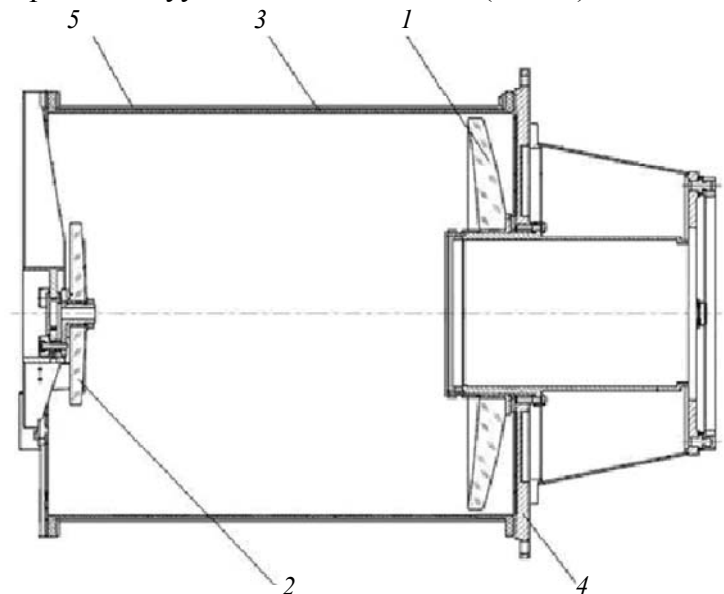


Рис. 2

Построение тепловой модели объектива ОЭС начинается с выделения основных элементов и определения тепловых связей между ними. Как видно из представленной конструкции объектива и соответствующего расчета оптической схемы, наиболее критичный параметр — это расстояние между главным и вторичным зеркалами. Первой ступенью реализации требуемого температурного режима является наличие экранно-вакуумной теплоизоляции, однако она не обеспечивает в полном объеме термостабильность, так как выполняет функцию экрана только для корпуса ОЭС. И поскольку теплоемкость ЭВТИ мала по сравнению

с теплоемкостью элементов объектива, ее влияние на тепловой режим можно не учитывать. Сама по себе система является совокупностью элементов с разными теплоемкостями, и элементы, теплоемкость которых ниже аналогичных параметров оптических элементов, в частности зеркал, не являются основными при составлении тепловой модели. Следовательно, для полноты тепловой модели эти элементы могут рассматриваться как тепловые мосты с заданными проводимостями. Таким образом, тепловая модель объектива сводится к системе пяти связанных между собой элементов: главного зеркала, вторичного зеркала, корпуса объектива, платформы МС, ЭВТИ.

Для построения тепловой модели телескопа примем следующие допущения:

- 1) все компоненты объектива изотермичны;
- 2) внешние тепловые потоки, воздействующие на объектив, — это собственный тепловой поток Земли, прямое и отраженное Землей солнечное излучение (методика их учета изложена в работах [1, 2]);
- 3) влияние МС на объектив в местах крепления задается граничным условием первого рода (задана температура);
- 4) электрические нагреватели равномерно распределены на платформе МС и корпусе объектива, при этом от мощности нагревателей зависит начальная температура всех элементов объектива; в период съемки нагреватели отключаются;
- 5) теплообмен излучением между зеркалами не учитывается вследствие малых значений степеней черноты их отражающих поверхностей.

При расчете теплового баланса каждого элемента учитываются тепловые потоки между ним и остальными элементами, его собственное излучение в окружающую среду, тепловыделение на поверхности элемента под воздействием внешних лучистых потоков и нагревателей. Математическая модель объектива представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих теплообмен между элементами конструкции ОЭС и внешней средой. В результате получаем систему уравнений для каждого из пяти элементов с разной проводимостью по i и j :

$$C_i \frac{dT_i}{d\tau} + \sum_{j=1}^n \sigma_{i-j} (T_i - T_j) + \varepsilon_i \varphi_{i-k} S_i \sigma T_i^4 = P_i, \quad (1)$$

где T_i и T_j — температура i -го и j -го элементов соответственно; σ_{i-j} — проводимость между элементами i и j ; C_i — полная теплоемкость i -го элемента; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ — постоянная Стефана — Больцмана; φ_{i-k} — коэффициент облученности между i -м элементом и космосом [3]; ε_i и S_i — степень черноты и площадь поверхности i -го элемента соответственно; P_i — мощность тепловыделений в i -м элементе под воздействием внешних тепловых потоков; n — число элементов, состоящих в теплообмене с элементом i ; τ — время.

Полная проводимость σ_{i-j} определяется как сумма лучистой и кондуктивной проводимостей между элементами i и j :

$$\sigma_{i-j} = \sigma_{л i-j} + \sigma_{к i-j}.$$

Кондуктивная составляющая складывается из собственных проводимостей соединительных элементов, рассчитанных по известным формулам [4], и тепловых проводимостей контактов:

$$\sigma_{к i-j} = S_c \eta,$$

где S_c — площадь контакта элементов; η — контактный коэффициент теплообмена, в вакууме $\eta = 100$ Вт/м²·К [1].

Для расчета лучистой составляющей проводимости между элементами телескопа используется формула [4]

$$\sigma_{li-j} = \varepsilon_{пр} \Phi_{i-j} S_i \sigma \frac{T_i^4 - T_j^4}{T_i - T_j},$$

где $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты поверхностей элементов i и j ; Φ_{i-j} — коэффициенты облученности элемента i элементом j .

Мощность тепловыделений в каждом элементе определяется как

$$P_i = [\varphi_i \varepsilon_i Q + \alpha_s (\varphi_k + \Phi) E] S_i, \quad (2)$$

где $Q = 235 \text{ Вт/м}^2$ — удельная мощность теплового излучения Земли от верхней границы атмосферы в открытый космос; $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; φ_i — коэффициент облученности i -го элемента поверхностью Земли с учетом высоты орбиты, угла наклона рабочей поверхности i -го элемента к плоскости местного горизонта и затенения другими элементами; φ_k — комбинированный коэффициент облученности i -го элемента отраженным Землей солнечным излучением, являющийся функцией высоты орбиты, угла наклона и затенения; Φ — геометрический фактор, учитывающий угол падения солнечных лучей и затенение; α_s — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью элемента.

Коэффициенты облученности внутри корпуса объектива вычисляются по известным формулам [3]. Для расчетов коэффициентов облученности φ_i и φ_k использовались методики, изложенные в работе [1].

На каждом шаге итерации численно решается система алгебраических уравнений (1) методом обратной матрицы. Нелинейные проводимости вычисляются по значениям температур, полученных на предыдущем шаге, по формулам

$$\sigma_i(T) = AT_{m-2}T_{m-1}^2,$$

где A — постоянная составляющая проводимости; T_{m-2} — значение температуры, полученное на итерации $m-2$; T_{m-1} — значение температуры, полученное на итерации $m-1$;

$$\sigma_i(T' - T'') = A \frac{(T'_{m-2})^2 - (T'_{m-1})^2 - (T''_{m-2})^2 - (T''_{m-1})^2}{T'_{m-1} - T''_{m-2}},$$

где T' и T'' — температуры элементов 1 и 2, находящиеся в теплообмене друг с другом.

В нестационарном режиме в качестве начальных условий для решения системы дифференциальных уравнений принимались температуры всех элементов, которые устанавливаются при закрытой светозащитной крышке и работе автономной системы терморегулирования. Эти температуры считаются одинаковыми и равными $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Величина смещения фокальной плоскости рассчитываются по формулам [2]

$$\Delta f = B_\Gamma \theta_\Gamma - B_K \theta_K + B_B \theta_B, \quad (3)$$

где θ_i — перегрев i -го элемента относительно начальной температуры; индексы означают: К — корпус, Г — главное зеркало, В — вторичное зеркало.

Коэффициенты B_i , м/К, определяются следующим образом:

$$B_\Gamma = \alpha_\Gamma \frac{R_\Gamma}{2} \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2; \quad B_K = \alpha_K L \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2; \quad B_B = \alpha_B 2a \left(\frac{1+e}{1-e} \right), \quad (4)$$

где R_Γ — параксиальный радиус приемного зеркала; L — расстояние между зеркалами; a — большая полуось гиперболы вторичного зеркала; e — эксцентриситет гиперболы; α_i — коэффициент линейного расширения i -го элемента.

Расчет. В конструкции ОЭС использовались зеркала из ситалла марки СО-115М, выполненный из углепластика корпус и платформа, изготовленная из титана марки ВТ1-О.

Исходные значения параметров элементов системы, использованные при расчете, приведены в табл. 1 (здесь M — масса элемента).

Таблица 1

Элемент	M , кг	C , Дж/К	ε	α_s
Главное зеркало	4,2	3167	0,5	0,01
Вторичное зеркало	0,7	528	0,5	0,01
Корпус	3,4	2720	0,9	0,3
Платформа	6,3	3352	0,9	0,3

В расчетах использовались также следующие значения параметров, входящих в соотношения (4): $R_\Gamma = 1,21$ м; $a = 0,11$ м, $L = 0,378$ м; $e = 2,763$; $\alpha_\Gamma = \alpha_B = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_K = 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; в результате значения коэффициентов в уравнении (3) следующие: $B_\Gamma = 0,413$ мкм/К; $B_K = 1,72$ мкм/К; $B_B = 0,07$ мкм/К.

В табл. 2—4 представлены вычисленные значения угловых коэффициентов (ζ) между элементами ОЭС; тепловых потоков (Ω), поглощенных элементами системы в зависимости от углов ее ориентации; тепловых проводимостей между конструктивными элементами телескопа.

Таблица 2

Элемент i	Угловой коэффициент ζ			
	Элемент j			
	Зрачок	Корпус	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Зрачок		0,84	0,16	—
Корпус	0,16		0,19	0,04
Главное зеркало	0,13	0,83		0,04
Вторичное зеркало	—	0,81	0,14	

Таблица 3

Углы, определяющие ориентацию: $\psi, \gamma_s, \dots^\circ$	Тепловой поток Ω , Вт, поглощенный			
	корпусом	главным зеркалом	вторичным зеркалом	ЭВТИ
$\psi = 0, \gamma_s = 0$	43,2	0,2	11,2	64,8
$\psi = 30, \gamma_s = 45$	30,7	0,2	7,9	146,2
$\psi = 30, \gamma_s = 60$	25,7	0,2	6,7	143,8

Таблица 4

Элемент	Проводимость σ_{i-j} Вт/К					
	Корпус	Главное зеркало	Вторичное зеркало	Платформа	ЭВТИ	МС
Корпус		—	0,0178	0,181	0,0025	—
Главное зеркало	0,024		—	0,407	—	—
Вторичное зеркало	0,0021	—		—	—	—
Платформа	—	0,078	—		—	0,344
ЭВТИ	—	—	—	—		—

Примечание: В верхней правой части относительно диагонали приведены величины кондуктивных проводимостей, а ниже диагонали — значения лучистых тепловых проводимостей.

Для переходных режимов были рассмотрены два варианта расчета термоаббераций:

1) положение МС в надир, положение Солнца в зените, температура в местах крепления $T_{кр} = 308$ К;

2) положение оптической оси ОЭС относительно вертикали — 30° , высота Солнца — 60° над горизонтом, $T_{кр} = 273$ К.

В расчетах принималось, что в обоих вариантах положение ОЭС относительно Земли и Солнца остается неизменным и тепловые потоки, описываемые соотношением (2), в течение всего цикла съемки постоянны.

Главное зеркало имеет наибольшую тепловую инерционность, вследствие чего основное влияние на смещение фокальной плоскости (в начале съемки) оказывает термодетформация корпуса.

В ходе исследований было установлено, что температуры элементов, а также смещение фокальной плоскости за время съемки (до 600 с) могут быть описаны уравнениями

$$\theta_i = U_i \tau, \quad \Delta f = V \tau,$$

где U_i , V — коэффициенты, характеризующие соответственно скорости нагрева элементов и термонаведенного смещения фокальной плоскости; величина V определяется с помощью соотношения

$$V = B_{\Gamma} U_{\Gamma} - B_{\text{К}} U_{\text{К}} + B_{\text{В}} U_{\text{В}};$$

значения U_i , в том числе для главного зеркала (U_{Γ}), корпуса ($U_{\text{К}}$) и вторичного зеркала ($U_{\text{В}}$) приведены в табл. 5, там же представлены значения перегревов элементов ОЭС в конце рабочего цикла.

Таблица 5

Элемент	Вариант 1		Вариант 2	
	$U_i \cdot 10^3$, К/с	θ_i , К	$U_i \cdot 10^3$, К/с	θ_i , К
Корпус	3,69	2,21	-1,43	-0,86
Главное зеркало	0,086	0,052	-0,13	-0,08
Вторичное зеркало	3,23	1,94	-1,19	-0,71
Платформа	1,46	0,88	-1,86	-1,12

Анализ табл. 5 показывает, что коэффициенты U_i и V являются постоянными с погрешностью $\pm 1\%$ в пределах прямой пропорциональности зависимости рассматриваемой ОЭС.

Значения скорости и величины смещения фокальной плоскости к концу съемки составили:

- для варианта 1: $V = -5,8 \cdot 10^3$ мкм/с, $\Delta f = -3,5$ мкм;
- для варианта 2: $V = 2,3 \cdot 10^3$ мкм/с, $\Delta f = 1,4$ мкм.

Эти значения не превышают допустимых.

Выводы.

1. Величины изменений температуры элементов и положения фокальной плоскости для нестационарного теплового режима ОЭС во время съемки пропорциональны времени. Это объясняется тем, что на начальном временном участке нагрева и охлаждения скорость изменения температуры элемента определяется отношением значения результирующего теплового потока к полной теплоемкости элемента.

2. Из всех элементов ОЭС наиболее сильное влияние на смещение фокальной плоскости оказывает корпус системы. Для ослабления этого влияния следует применять углепластик.

3. В соответствии с проведенными исследованиями по созданию тепловой модели ОЭС удалось обеспечить в реальной системе в пределах 10 мин рабочего времени температурный режим 20 ± 5 °С, при котором не происходит смещение фокальной плоскости и ухудшение качества изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа — солнечного лимбографа. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. техн. ун-та, 2008. 195 с.
2. Абдусаматов Х. И., Богдавленский А. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Исследование термостабильности зеркального телескопа — солнечного лимбографа в режиме непрерывного наблюдения за Солнцем // Оптик. журн. 2009. Т. 76, № 5. С. 51—59.
3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.

4. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.

Сведения об авторах

- Юлия Валерьевна Баёва** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: dav_60@mail.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга
- Сергей Ильич Жуков** — АО „ЛОМО“, Санкт-Петербург; главный специалист

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
01.09.11 г.