

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.373.526

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМОАБЕРРАЦИЙ ТЕЛЕСКОПА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

© 2012 г. Ю. В. Баёва, аспирант; С. И. Ханков, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: yul.bayo@yandex.ru

Разработана аналитическая методика расчета теплового режима и термонаведенного смещения фокальной плоскости телескопа космического базирования при кратковременном наблюдении за Землей и продолжительном восстановлении до исходного теплового состояния в периоды между съемками. Методика существенно упрощает расчеты и позволяет быстро оценить возможности обеспечения термостабильности телескопа.

Ключевые слова: космический телескоп, оптико-электронные системы, тепловой режим, термоабберация.

Коды OCIS: 120.4640, 120.0280, 350.1246, 350.6050, 350.6090

Поступила в редакцию 28.02.2012

Проведенные ранее исследования теплового режима и термоаббераций телескопа для микроспутниковой оптико-электронной системы (ОЭС) показали, что при кратковременном функционировании (до 10 мин) наблюдается линейный во времени рост температур и термонаведенного смещения фокальной плоскости [1]. Это позволяет значительно упростить разработку аналитической методики расчета термоаббераций такого класса телескопов, что весьма актуально с учетом затрат на их проектирование, создание и эксплуатацию.

Формулы для расчетов термонаведенного смещения фокальной плоскости

Рассматриваемый телескоп построен по схеме Ричи-Кретьена, где главное и вторичное зеркала – гиперболоиды вращения. Для телескопов данного типа термонаведенное смещение фокальной плоскости рассчитывается по формуле [2]

$$\Delta f = B_1 \vartheta_1 - B_3 \vartheta_3 + B_2 \vartheta_2, \quad (1)$$

где $\vartheta_i = T_i - T_H$ перегрев i -го элемента относительно начальной температуры T_H . Индексами

означены: 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – корпус.

Коэффициенты B_i [м/К] определяются по формулам

$$B_1 = \alpha_1 \frac{R_1}{2} \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2, \quad B_2 = \alpha_2 2a \left(\frac{1+e}{1-e} \right), \quad (2)$$
$$B_3 = \alpha_3 L \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2,$$

где R_1 – параксиальный радиус главного зеркала, L – расстояние между зеркалами, a – большая полуось гиперболы вторичного зеркала, e – эксцентриситет гиперболы, α_i – коэффициент линейного расширения i -го элемента.

Исходные данные для расчетов

В расчетах использовались следующие значения параметров, входящих в соотношение (2): $R_1 = 1,21$ м, $a = 0,11$ м, $L = 0,378$ м, $e = 2,763$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,5 \times 10^{-7}$ К⁻¹, $\alpha_3 = 10^{-6}$ К⁻¹. Основными теплонагруженными элементами микроспутниковой ОЭС являются выполненные из ситалла главное и вторичное зеркала, углепластиковый корпус и титановая платформа (индекс 4). В местах крепления платформы к космическому аппарату (КА) задается гра-

ничное условие – температура T_0 , диапазон изменения которой составляет 0–35 С. Рассматриваются три варианта начальной граничной температуры в местах крепления платформы к КА: $T_0 = 308$ К, $T_0 = 293$ К, $T_0 = 273$ К. В момент съемки телескоп ориентирован в надир, Солнце находится в зените. Начальная температура T_H всех элементов принимается равной 293 К. Тепловые потоки излучения Земли и отраженного ею солнечного излучения, поглощенные элементами телескопа, составляют для корпуса 43,2 Вт, для главного зеркала

ла – 0,2 Вт, для вторичного зеркала – 11,2 Вт. Кондуктивная проводимость между главным зеркалом и платформой 0,407 Вт/К, между вторичным зеркалом и корпусом – 0,0178 Вт/К, между платформой и корпусом – 0,181 Вт/К.

Математическая модель

Математическая модель процесса нагрева основных элементов телескопа описывается системой четырех дифференциальных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{d\tau} + \sigma_{14}(T_1 - T_4) &= P_1 \\ C_2 \frac{dT_2}{d\tau} + \sigma_{23}(T_2 - T_3) + b_2 T_2^4 &= P_2 \\ C_3 \frac{dT_3}{d\tau} + \sigma_{23}(T_3 - T_2) + \sigma_{34}(T_3 - T_4) + b_3 T_3^4 &= P_3 \\ C_4 \frac{dT_4}{d\tau} + \sigma_{34}(T_4 - T_3) + \sigma_{14}(T_4 - T_1) + \sigma_{40}(T_4 - T_0) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где T_i – температура i -го элемента, T_0 – начальная температура в местах крепления платформы к КА, C_i – полная теплоемкость i -го элемента, σ_{ij} – проводимость между элементами i и j , P_i – мощность тепловыделений в i -ом элементе под воздействием внешних лучистых теплопритоков. Индексы i соответствуют: 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – корпус, 4 – платформа. Начальные условия задаются одинаковыми для всех элементов $T_i(\tau) = T_H$.

Коэффициенты b_i вычисляются по формуле

$$b_i = \varepsilon_i \varphi_i S_i \sigma, \quad (4)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ – постоянная Стефана–Больцмана, φ_i – коэффициент облученности между i -м элементом и космосом, ε_i и S_i – коэффициент черноты и площадь поверхности i -го элемента соответственно.

Полученные в результате численного решения системы (3) значения перегревов к моменту окончания съемки, стационарных перегревов, а также их отношения приведены в табл. 1.

Как следует из ее данных, при кратковременном режиме функционирования вторичное зеркало и корпус не чувствительны к изменению граничных условий на платформе. Значительна разница между перегревами на момент конца съемки и стационарными перегревами, при этом минимальное время выхода на стационарный режим приходится на третий вариант для вторичного зеркала и корпуса и равняется 8 ч, что превышает время съемки (600 с)

Таблица 1. Значения перегревов на момент конца съемки ϑ_e [К] и стационарных перегревов ϑ_C [К] основных элементов телескопа для трех вариантов температур платформы

Номер варианта	Перегрев	Элементы			
		1	2	3	4
1 ($T_0 = 308$ К)	ϑ_e	0,07	3,7	2,6	0,9
	ϑ_C	19,4	27,3	25	18,9
	ϑ_e/ϑ_C	0,004	0,136	0,104	0,048
2 ($T_0 = 293$ К)	ϑ_e	0,04	3,7	2,6	0,04
	ϑ_C	8,6	27	22,3	8,1
	ϑ_e/ϑ_C	0,005	0,137	0,117	0,005
3 ($T_0 = 273$ К)	ϑ_e	-0,003	3,7	2,6	-1,1
	ϑ_C	-5	25	17	-7
	ϑ_e/ϑ_C	0,0006	0,148	0,153	0,157

в 48 раз. По данным расчетов в пределах продолжительности съемки перегревы оптических элементов растут пропорционально времени (линейный участок нагрева).

Получение приближенных аналитических формул

Обозначим перегревы как $\vartheta_i = T_i - T_H$, тогда с учетом их малости $\vartheta_i \ll T_H$ получим

$$b_i T_i^4 = G_i + g_i \vartheta_i, \quad G_i = b_i T_H^4, \quad g_i = 4b_i T_H^3. \quad (5)$$

Учитывая выражения (5), вместо системы (3) можно получить новую эквивалентную систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\vartheta_1}{d\tau} + \sigma_{14}(\vartheta_1 - \vartheta_4) &= P_1 \\ C_2 \frac{d\vartheta_2}{d\tau} + \sigma_{23}(\vartheta_2 - \vartheta_3) + g_2 \vartheta_2 &= P_2 - G_2 \\ C_3 \frac{d\vartheta_3}{d\tau} + \sigma_{23}(\vartheta_3 - \vartheta_2) + \sigma_{34}(\vartheta_3 - \vartheta_4) + g_3 \vartheta_3 &= P_3 - G_3 \\ C_4 \frac{d\vartheta_4}{d\tau} + \sigma_{34}(\vartheta_4 - \vartheta_3) + \sigma_{14}(\vartheta_4 - \vartheta_1) + \sigma_{40} \vartheta_4 &= \sigma_{40} \vartheta_0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Преобразуем систему (6) к виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vartheta_1}{d\tau} + m_1 \vartheta_1 - m_1 \vartheta_4 &= u_{10} \\ \frac{d\vartheta_2}{d\tau} + m_2 \vartheta_2 - m_{23} \vartheta_3 &= u_{20} \\ \frac{d\vartheta_3}{d\tau} + m_3 \vartheta_3 - m_{32} \vartheta_2 - m_{34} \vartheta_4 &= u_{30} \\ \frac{d\vartheta_4}{d\tau} + m_4 \vartheta_4 - m_{43} \vartheta_3 + m_{41} \vartheta_1 &= u_{40} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В систему (7) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{\sigma_{14}}{C_1}, \quad m_2 = \frac{\sigma_{23} + g_2}{C_2}, \quad m_{23} = \frac{\sigma_{23}}{C_2}, \\ m_3 &= \frac{\sigma_{23} + \sigma_{34} + g_3}{C_3}, \quad m_{32} = \frac{\sigma_{23}}{C_3}, \quad m_{34} = \frac{\sigma_{34}}{C_3}, \\ m_4 &= \frac{\sigma_{34} + \sigma_{14} + \sigma_{40}}{C_4}, \quad m_{43} = \frac{\sigma_{34}}{C_4}, \quad m_{41} = \frac{\sigma_{14}}{C_4}, \quad (8) \\ u_{10} &= \frac{P_1}{C_1}, \quad u_{20} = \frac{P_2 - G_2}{C_2}, \\ u_{30} &= \frac{P_3 - G_3}{C_3}, \quad u_{40} = \frac{\sigma_{40} \vartheta_0}{C_4}. \end{aligned}$$

Очевидно, что $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, $m_{ij} \neq m_{ji}$.

Исходя из концепции наличия на начальном участке прямопропорциональной зависимости перегрева от времени, введем коэффициенты пропорциональности, определяемые соотношениями

$$\frac{d\vartheta_i}{d\tau} = U_i, \quad \vartheta_i = U_i \tau, \quad \vartheta_j = U_j \tau. \quad (9)$$

В результате вместо системы (7) можно получить

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{10} + a_{14} U_4 \\ U_2 &= U_{20} + a_{23} U_3 \\ U_3 &= U_{30} + a_{32} U_{20} + a_{34} U_4 \\ U_4 &= U_{40} + a_{43} U_{30} + a_{41} U_1 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В системе (10) введены обозначения

$$U_{i0} = \frac{u_{i0}}{1 + m_i \tau}, \quad a_{ij} = \frac{m_{ij} \tau}{1 + m_i \tau}.$$

Очевидно, что на начальном временном участке нагрева выполняются условия $m_i \tau \ll 1$.

Пренебрегая произведениями a_{ij} ввиду их малости, можно получить решение системы (10) в виде

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{10} + a_{14} U_{40} \\ U_2 &= U_{20} + a_{23} U_{30} \\ U_3 &= U_{30} + a_{32} U_{20} + a_{34} U_{40} \\ U_4 &= U_{40} + a_{43} U_{30} + a_{41} U_{10} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Результаты расчетов скоростей нагревов

Система (11) представляет собой приближенное решение системы дифференциальных уравнений (3), выраженное через скорости нагрева основных элементов. Результаты численного и приближенного решений, а также погрешность приближенного решения представлены в табл. 2. Значения погрешностей для каждого элемента вычислялись по формуле $\delta_i = (Un_i - Ua_i)/Un_i$, где Un_i – значение, полученное численно, Ua_i – приближенное значение.

В результате исследования выявлены факторы, определяющие температурный режим телескопа, скорость роста температуры элементов. Скорость роста температур вторичного зеркала и корпуса при кратковременном режиме работы (в данном случае до 10 мин) зависит лишь от поглощенных элементами лучистых тепловых потоков от Земли и не зависит от температуры платформы. Снижение скорости роста и значения перегрева корпуса к моменту окончания съемки может быть достигнуто только при снижении поглощения лучистых

Таблица 2. Значения коэффициентов $U_i \times 10^3$ К/с и относительных погрешностей δ_i , %

Номер варианта	Метод расчета и погрешность	Элементы			
		1	2	3	4
1	численный	0,12255	6,163	4,404	1,49
	приближенный	0,15784	5,791	4,171	1,437
	погрешность	-29	6	5	4
2	численный	0,068	6,16	4,38	0,07
	приближенный	0,064	5,791	4,125	0,117
	погрешность	6	6	6	-67
3	численный	-0,00433	6,16	4,34	-1,82
	приближенный	-0,00296	5,791	4,08	-1,202
	погрешность	-32	6	6	-34

потоков за счет использования специальных покрытий на внутренней поверхности корпуса. Это эффективно, поскольку разности отдаваемых и излучаемых потоков $P_i - G_i$ пропорциональны степени черноты ε_i . Скорость нагрева главного зеркала (как и платформы) зависит от начальной температуры в местах крепления платформы к КА. Прирост температуры главного зеркала мал по сравнению с ростом температур корпуса и вторичного зеркала. Для получения окончательных выводов необходимо исследование термоаббераций телескопа как конечной определяющей величины.

Результаты расчетов термоаббераций

Расчет изменения положения фокальной плоскости проводится по формуле $\Delta f = V\tau$, V – скорость приращений термонаведенного смещения фокальной плоскости.

Величина V выражается через совокупность U_i с помощью соотношения

$$V = B_1 U_1 - B_3 U_3 + B_2 U_2. \quad (12)$$

Значения коэффициентов в уравнении (12) следующие: $B_1 = 0,413$ мкм/К, $B_2 = -0,07$ мкм/К, $B_3 = 1,72$ мкм/К. В табл. 3 приведены значения смещений фокальной плоскости, а также коэффициенты V_i для различных вариантов температуры платформы, вычисленные с использованием данных численного расчета и при использовании приближенного решения.

Как показали результаты исследований, расхождение между значениями смещения фокальной плоскости при разных вариантах

Таблица 3. Коэффициенты $V \times 10^3$ мкм/с и значения смещения фокальной плоскости Δf мкм к моменту окончания съемки

Номер варианта	Приближенное решение		Численное решение	
	V	Δf	V	Δf
1	-7,51	-4,51	-7,96	-4,78
2	-7,47	-4,48	-7,94	-4,76
3	-7,42	-4,46	-7,9	-4,74

решения не превышает 7%, при этом погрешность приближенного расчета весьма мала, что позволяет использовать аналитическую методику для практических оценок. Допустимое смещение фокальной плоскости оценивается исходя из глубины резкости, рассчитываемой по формуле

$$Z = 2,44(\lambda/A^2), \quad A = D/f, \quad (13)$$

где λ – длина волны, A – относительное отверстие оптической системы, D – диаметр входного зрачка, f – фокусное расстояние оптической системы. При $\lambda = 0,6$ мкм, $D = 350$ мм и $f = 1670$ мм величина $Z = 33,3$ мкм. Таким образом, термонаведенное смещение фокальной плоскости примерно в 7 раз меньше допустимого значения.

Выводы

Предложенная методика расчета позволяет на начальных этапах проектирования с малой погрешностью вычислять приращения температур элементов космического телескопа с кратковременным циклом функционирования, а также значения термонаведенного смещения фокальной плоскости.

Температура платформы влияет только на тепловой режим главного зеркала и практически не влияет на тепловые режимы вторичного зеркала и корпуса, при этом не заметно никакого влияния температуры платформы на термонаведенное смещение фокальной плоскости. Это объясняется малыми диапазонами вариаций перегревов главного зеркала по сравнению с корпусом и вторичным зеркалом, а также тем, что в формуле (12) $B_3 > 4B_1$. Величина B_2 столь мала, что перегрев вторичного зеркала очень слабо влияет на термонаведенное смещение фокальной плоскости.

Термоабберации телескопа находятся в пределах допустимых значений, но в случае необ-

ходимости существенного увеличения времени съемки наиболее эффективным способом обеспечения максимальной термостабильности является принятие мер по снижению степени черноты внутренней поверхности корпуса, что обусловлено преобладающим влиянием на термоабerrацию его перегрева.

Выявленные закономерности присущи всем телескопам с кратковременным циклом функ-

ционирования и длительным восстановлением до начальных температур в периоды между съемками. Критерием кратковременности может служить отношение перегревов в конце циклов к стационарным перегревам. Перегревы в течение цикла работы могут оцениваться по формулам вида (11), а стационарные перегревы могут определяться из системы уравнений вида (3) при $dT_i/d\tau = 0$.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баёва Ю.В., Демин А.В., Ханков С.И.* Моделирование теплового режима и термоабerrаций малогабаритного космического телескопа // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 5. С. 7–10.
2. *Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И.* Методы обеспечения термостабильности космического телескопа – солнечного лимбографа. СПб.: Из-во Санкт-Петербургского политехнического университета, 2008. 195 с.