

Ю. В. БАЁВА, С. И. ХАНКОВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ ТЕЛЕСКОПА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ БЛЕНДЫ

Обсуждается проблема обеспечения термостабильности телескопов космического базирования для наблюдения за Землей. Введено понятие фоновой температуры на входном зрачке телескопа, которая характеризует степень отклонения его теплового баланса от начального, реализуемого в дежурном режиме при закрытой крышке на входном зрачке. Получены формулы для расчета зависимости требуемой рабочей температуры бленды от заданной фоновой температуры на входном зрачке телескопа и от отношения длины бленды к диаметру входного зрачка.

Ключевые слова: космический телескоп, бленда, коэффициент облученности, тепловой режим, теплообмен излучением.

Для поддержания термостабильности телескопа дистанционного зондирования Земли после открытия крышки на входном зрачке необходимо обеспечить минимальное искажение начального теплового баланса.

При формировании тепловой модели телескопа введем следующие ограничения:

- непрерывное наблюдение осуществляется в направлении центра Земли, в случае использования сканирования такая ситуация будет отражать среднее положение телескопа;
- телескоп находится в замкнутом термостатированном объеме и все процессы теплообмена, способные вызвать изменения его теплового режима и возникновение термоаббераций, могут осуществляться только через входной зрачок;
- прямое солнечное излучение не попадает в полость бленды и тем более во входной зрачок телескопа;
- засветки Солнца снаружи бленды не вызывают ее нагрева, поскольку парируются системой термостатирования и высоким коэффициентом отражения ее поверхности; представляет интерес особый случай, когда поглощаемая наружной поверхностью бленды мощность солнечного излучения сама может использоваться для управления температурным уровнем.

Тепловая модель не имеет ограничений, связанных с рабочим спектральным диапазоном телескопа. Она применима для случая наблюдения как за частью поверхности Земли, подсвеченной Солнцем, так и за теневой частью поверхности Земли.

Если ось входного зрачка телескопа направлена на Землю, реализуется осесимметричная модель вложенных конусов, ограничивающих наблюдаемые с плоскости зрачка элементы внешней среды. Внутренним конусом ограничивается телесный угол ω , в пределах которого входной зрачок принимает излучение Земли. Средний конус содержит телесный угол, образованный внешним срезом цилиндрической бленды, в пределах этого угла осуществляется теплоотдача с входного зрачка в холодный космос за вычетом внутреннего телесного угла ω , в пределах которого видна Земля. Внешний телесный угол ограничен предельным углом 2τ за вычетом телесного угла ξ , в пределах которого осуществляется теплообмен входного зрачка с блендой.

При исследовании теплового баланса на входном зрачке телескопа использовались данные по всем компонентам баланса, приведенные в работе [1].

Уравнение стационарного теплового баланса на входном зрачке телескопа можно записать следующим образом:

$$Q_m \varphi_0 \varepsilon + \alpha_s \varphi_k A E = \frac{\xi - \omega}{2\pi} \varepsilon \sigma T_w^4 + \frac{2\pi - \xi}{2\pi} \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_b^4), \quad (1)$$

где $Q_m = 235 \text{ Вт/м}^2$ — максимальный удельный тепловой поток, излучаемый поверхностью Земли; φ_0 — коэффициент облученности Землей горизонтальной площадки, лежащей в плоскости местного горизонта, которая может быть представлена как плоскость входного зрачка телескопа при наблюдении в надири; ε — степень черноты входного зрачка; α_s — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью входного зрачка; φ_k — комбинированный коэффициент облученности, учитывающий отраженное Землей солнечное излучение; A — альbedo Бонда; $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — постоянная Стефана — Больцмана; T_w — фоновая температура на входном зрачке, определяющая приращение результирующего теплового потока; T_b — температура бленды.

Решение уравнения (1) относительно температуры T_w можно представить в следующем виде:

$$T_w = \sqrt[4]{\frac{\theta_p \varphi_0 (1+U) + (1-\xi') T_b^4}{1-\omega'}} = T_e^* \sqrt[4]{\frac{1+U + (1-\xi') \theta_m}{1-\omega'}}; \quad (2)$$

$$\theta_p = \frac{Q_m}{\sigma} = 41,45 \cdot 10^8 \text{ К}^4; \quad \xi' = \frac{\xi}{2\pi}; \quad \omega' = \frac{\omega}{2\pi}; \quad U = U_0 n_s \frac{\varphi_k}{\varphi_0}; \quad U_0 = \frac{AE}{Q_m} = 1,74; \quad n_s = \frac{\alpha_s}{\varepsilon};$$

$$T_e^* = \sqrt[4]{\frac{Q_m}{\sigma} \varphi_0} = T_e \sqrt[4]{\varphi_0}; \quad T_e = \sqrt[4]{\theta_p} = 254 \text{ К}; \quad \theta_m = \frac{T_b^4}{\theta_p \varphi_0} = \frac{1}{\varphi_0} \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4,$$

где T_e — эффективная температура Земли, т.е. температура, соответствующая равновесному тепловому состоянию планеты с абсолютно черной поверхностью; T_e^* — условный температурный фон на высоте h орбиты телескопа над поверхностью Земли, обусловленный ее собственным тепловым излучением.

Выражения для телесных углов нетрудно определить через соответствующие геометрические параметры, в результате получим

$$1 - \xi' = (1 + \rho^2)^{-0,5} = b; \quad \rho = r/H; \quad 1 - \omega' = \sqrt{1 - \varphi_0}; \quad \varphi_0 = (1 + a)^{-2}; \quad a = h/R,$$

где H — высота бленды; r — радиус входного зрачка телескопа; R — радиус Земли.

В результате формула (2) может быть преобразована к виду

$$T_w = T_e \sqrt[4]{\frac{\varphi_0 (1+U) + b \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4}{\sqrt{1 - \varphi_0}}} = T_e \left[k(1+U) + \frac{1}{\psi} \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4 \right]^{0,25}; \quad (3)$$

$$k = \frac{\varphi_0}{\sqrt{1 - \varphi_0}}; \quad \psi = \sqrt{(1 + \rho^2)(1 - \varphi_0)},$$

здесь коэффициент $b = (1 + \rho^2)^{-0,5}$ характеризует относительную длину бленды.

Для практических расчетов представляет интерес получение на основе формулы (3) обратной зависимости T_b от T_w , которая позволит оценить требования к температуре бленды для сохранения начальной температуры фона на входном зрачке телескопа:

$$T_b = T_w \psi^{0,25} [1 - kN(1+U)]^{0,25}; \quad N = \left(\frac{T_e}{T_w} \right)^4. \quad (4)$$

На высоте геостационарной орбиты 40 000 км коэффициент облученности входного зрачка как плоской площадки равен $\varphi_0 = 0,0189$, а телесный угол, в пределах которого видна Земля, $\omega = 0,06$ ср. При условии $T_w > T_e$ в формуле (4) можно пренебречь произведением с малой величиной k , поскольку коэффициент φ_0 мал. Тогда в случае наблюдения за теневой поверхностью Земли ($U = U_0 = 0$) соотношение (4) упрощается:

$$T_b = T_w \sqrt[4]{\psi} = T_w (1 + \rho^2)^{0,125}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что для высокоорбитальных систем температура бленды должна быть выше фоновой температуры, равной рабочей температуре телескопа.

Предельная длина бленды, при которой через нее видна Земля в ее полном размере (при $\omega = \xi$), определяется из соотношения

$$H = r \sqrt{2a + a^2}.$$

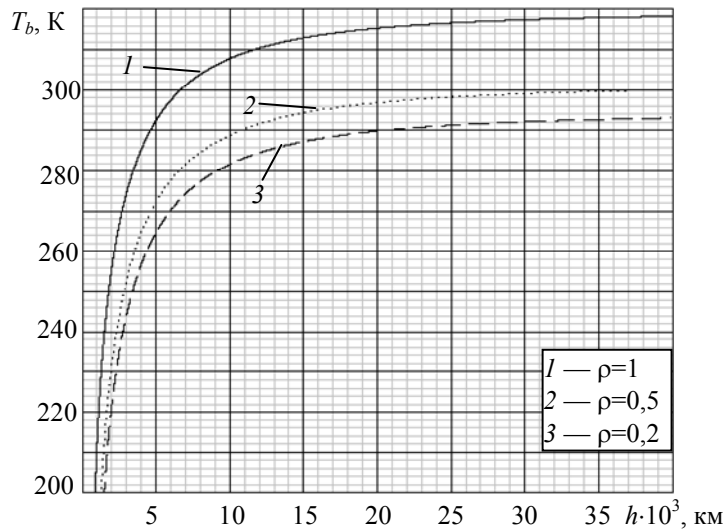
Для геостационарной орбиты $a = 5,9$, откуда при $r = 0,1$ м длина бленды, сквозь которую видна только поверхность Земли, должна быть равна $H = 0,68$ м. При этом $\rho = 0,147$, и при $T_w = 293$ К в соответствии с уравнением (5) можно получить $T_b = 293,8$ К.

Для оценки степени значимости величины U в уравнении (4) можно применить формулу, которая получена с использованием данных монографии [2]:

$$\frac{\varphi_k}{\varphi_0} = \frac{60}{60 + h_0} \cos \zeta \cos \gamma; \quad h_0 = \frac{h}{1000},$$

где высота h_0 задается в тысячах километров; ζ — угол наклона плоскости входного зрачка к плоскости местного горизонта (ранее принято $\zeta = 0$); γ — угол между направлением на Солнце и на центр Земли с вершиной в центре входного зрачка.

На рисунке представлены вычисленные по формуле (5) зависимости требуемой рабочей температуры бленды, обеспечивающей поддержание уровня фоновой температуры $T_w = 293$ К, от высоты орбиты. На участках зависимостей $T_b(T_w)$ ниже уровня 293 К существенное тепловое влияние Земли создает положительное приращение теплового баланса, что требует охлаждения бленды до соответствующих температур, определяемых по графику.



Полученные формулы позволяют произвести быструю оценку значимых параметров, определяющих требования к температуре бленды, обеспечивающей заданную фоновую температуру на входном зрачке телескопа, а также сохранение начального теплового баланса в телескопе. Если телесный угол ω равен нулю, реализуется ситуация, характерная для наблюдения за звездами; в этом случае также можно обеспечить термостабильность телескопа за счет управления температурой бленды, при этом могут быть использованы полученные формулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J.* Earth's global energy budget // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2009. Vol. 90, N 3, P. 311—323.
2. *Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. СПб: НТЦ им. Л. Т. Тучкова, 2006. 186 с.

Сведения об авторах

- Юлия Валерьевна Байва** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергетического мониторинга

Поступила в редакцию
29.12.12 г.