

473-476

辐射温差的传递模型

陈立学

(西安应用光学研究所, 陕西, 西安, 710065)

TN215.01

摘要 通过对热成像系统辐射能量传递链的分析, 给出了辐射温差传递的概念, 建立了辐射温差在均匀介质和成像系统中的数学传递模型。

关键词 辐射温差, 透过率, 热成像系统, 望远镜系统。

引言

热成像系统的主要性能参数, 如最小可分辨温差(MRTD)、最小可探测温差(MDTD)、信号传递函数(SiTF)等, 均由“温差”来定义, 因此在辐射能量的传输过程中引入“温差传递”的概念, 对于热成像系统性能参数的计算是很有必要的。

1 均匀介质的温差传递

对于各向同性的均匀介质, 某一段内的平均透过率可表达为:

$$\tau = M(T') / M(T), \quad (1)$$

式(1)中 T 、 T' 分别表示输入和输出的辐射温度, 根据 Planck 定律

$$M(T) = \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda, \quad (2)$$

$$M(T') = \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T'} - 1} d\lambda; \quad (3)$$

如果我们分别以 T_i 、 T_b 表示输入目标和背景的辐射温度, 而以 T'_i 、 T'_b 表示输出目标和背景的辐射温度, 则有温差:

$$\begin{aligned} \Delta M' &= M(T'_i) - M(T'_b) = \tau \cdot M(T_i) - \tau \cdot M(T_b) \\ &= \tau [M(T_i) - M(T_b)] = \tau \cdot \Delta M; \end{aligned} \quad (4)$$

通过查阅辐射度表, 由 T_i 、 T_b 可得到 $M(T_i)$ 、 $M(T_b)$, 再由式(4)计算得到 $M(T'_i)$ 、 $M(T'_b)$, 反查辐射度表得到 T'_i 、 T'_b , 于是可得到输出温差^[1]: $\Delta T' = T'_i - T'_b$. 这种反复查表方法繁琐, 而且制表数值不连续, 其结果必然是近似的, 为此, 我们在数学推导时作些合理近似。

我们假定在一个窄波段范围内, 透过率取平均值 τ , 把式(2)、(3)代入式(1)有:

$$\int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda = \tau \cdot \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda,$$

由积分性质可得

$$\frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} = \frac{\tau}{e^{c_2/\lambda T} - 1},$$

对热成像所用的大气窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外波段和 $220\text{K} \sim 320\text{K}$ 的温度范围, 取极端情况也能满足 $c_2 \gg \lambda T$, 则 $e^{c_2/\lambda T} - 1 \approx e^{c_2/\lambda T}$, $e^{c_2/\lambda T} - 1 \approx e^{c_2/\lambda T}$, 故可取近似为

$$e^{-c_2/\lambda T} \approx \tau \cdot e^{c_2/\lambda T}. \quad (5)$$

经整理可得到辐射温度传递表达式为

$$T' = \frac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln \tau}, \quad (6)$$

输出辐射温差即为:

$$\Delta T' = T'_t - T'_b = \frac{c_2 T_t}{c_2 - \lambda T_t \ln \tau} - \frac{c_2 T_b}{c_2 - \lambda T_b \ln \tau}. \quad (7)$$

对于小温差情况, 可进一步近似, 对式(6)以微分代替差分, 则得到温差传递表达式:

$$\frac{\Delta T'}{\Delta T} \approx \frac{dT'}{dT} = \left(\frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln \tau} \right)^2, \quad (8)$$

即

$$\Delta T' = \left(\frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln \tau} \right)^2 \Delta T. \quad (9)$$

通过对式(5)和(8)两项近似进行误差分析, 在热成像所用波段, 温差从 -50K 到 50K 范围内最大偏差不超过 1.2% , 两者符合相当好, 因而式(9)是一个实用的辐射温差传递模型. 在此, 我们用已经介绍的三种计算温差传递的方法, 即查表和式(7)、(9), 对一组典型数据进行计算以比较它们的结果: 取 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的中心波长 $10 \mu\text{m}$, 目标辐射温度 $T_t = 300\text{K}$, 背景辐射温度 $T_b = 294\text{K}$, 辐射温差 $\Delta T = T_t - T_b = 6\text{K}$, 介质透过率 $\tau = 0.66$.

(1) 用查表法计算得

$$\begin{aligned} M(T_t) &= M(300) = 120.9382, & M(T'_t) &= \tau \cdot M(T_t) = 79.8897; \\ M(T_b) &= M(294) = 109.4254, & M(T'_b) &= \tau \cdot M(T_b) = 72.2845 \end{aligned}$$

反查表得

$$T'_t = 276.54\text{K}, \quad T'_b = 271.39\text{K}, \quad \Delta T' = T'_t - T'_b = 5.15\text{K}.$$

(2) 用式(7)计算得

$$\Delta T' = \frac{c_2 T_t}{c_2 - \lambda T_t \ln \tau} - \frac{c_2 T_b}{c_2 - \lambda T_b \ln \tau} = 276.0807\text{K} - 270.9886\text{K} = 5.0921\text{K}.$$

(3) 用式(9)计算得

$$\Delta T' = \left(\frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln \tau} \right)^2 \Delta T = 5.0976\text{K}.$$

三种方法结果相当接近, 相差仅为 1% 左右, 而式(7)和式(9)结果相差仅为 0.1%。

2 成像光学系统的温差传递

式(9)给出的模型适合于非成像均匀介质, 对于有限孔径成像系统辐射温差传递情况, 我们假定一个入瞳面积为 S 、焦距为 f 、透过率为 τ 的光学系统, 像面面积为 A (见图 1)。

由立体角投影定律^[2]可以导出像面照度为

$$E = \frac{\varphi}{A} = \frac{\tau \cdot S}{\pi \cdot f^2} M, \quad (10)$$

式(10)中 M 为物体的辐出度, 大气透过率 $\tau = \tau_a \tau_o$, 把 $(\tau S / \pi f^2)$ 理解为成像系统的能量传递因子, 以其直接代替式(9)中的因子 τ , 即得到成像系统温差传递模型:

$$\Delta T' = \left(\frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln K_I} \right)^2 \Delta T_I, \quad (11)$$

$$K_I = \frac{\tau \cdot S}{\pi \cdot f^2}. \quad (12)$$

对于圆形对称光学系统(其中 D 为入瞳直径)有

$$K_I = \frac{\tau}{\pi \cdot f^2} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = \frac{\tau}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2. \quad (13)$$

由于探测器的参数一般不用温差定义, 因此直接用式(11)计算像面温差意义不大, 但可以利用这个结果分析光学系统对热成像系统 MRTD 的影响。

3 望远系统的温差传递

对采用标准扫描器的通用组件热像仪, 通常采用更换望远系统的方法以获得不同的性能, 为此需要知道望远系统的温差传递性能。热像仪为充分利用能量, 一般采用圆形无渐晕光学系统(见图 2), 可以认为通过望远镜入瞳 D_1 的辐射通量 φ 除吸收(由透过率 τ 给出)外, 全部达到出瞳 D_2 。

由式(10)可知, 像面 A 处的照度为 E , 整个像面所接收到的辐射通量为

$$\varphi = EA = \frac{\tau_a \tau_o A}{4} \left(\frac{D_1}{f} \right)^2 M_1,$$

式中 τ_o 为物镜部分透过率, D_1 为入瞳直径, f 为物镜焦距, A 为像面面积, M_1 为目标的辐出度。辐射通量 φ 乘以目镜透过率后全部到达出瞳, 则出瞳处辐出度为

$$M_2 = \frac{\varphi \tau_c}{\pi D_2^2 / 4},$$

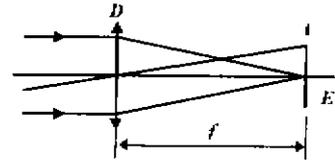


图 1 成像系统
Fig. 1 Imaging system

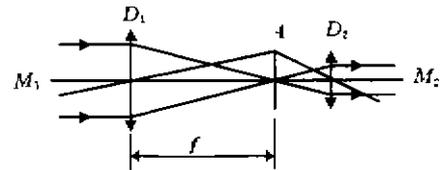


图 2 望远镜系统
Fig. 2 Telescope system

其中 D_2 为出瞳直径, τ_r 为目镜透过率. 由望远系统的物像的几何关系得到

$$M_2 = \frac{\tau \cdot FOV_c^2}{4} M_1, \quad (14)$$

其中 $\tau = \tau_a \tau_o \cdot \tau_e$ 为系统透过率, FOV_c 为望远系统出瞳视场, 望远系统的传递因子为

$$K_T = \frac{\tau}{4} FOV_c^2, \quad (15)$$

用它代替式(9)中的因子 τ , 即可得到望远系统的辐射温差传递模型

$$\Delta T'_T = \left(\frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln K_T} \right)^2 \Delta T_T. \quad (16)$$

对于 FOV_c 比较大的情况, 式(15)应修正为

$$K_T = \tau \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{FOV_c}{2} \right). \quad (17)$$

4 结语

对于热成像系统, 辐射能量传递是一个非常复杂的过程, 尤其是大气传输环节, 难以用数学模型精确描述, 因此用本文所给出的近似模型模拟实际传递过程, 对热成像系统性能参数的设计计算是很有意义的. 文中的结果对于其它以温差工作的系统(如测温系统)的性能参数计算也有参考价值.

REFERENCES

- 1 CHEN Li-Xue. *Applied Optics* (陈立学, 应用光学), 1995, 16(1): 13~16
- 2 Walter G D, et al. *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Inc., 1978, 1~6

THE MODEL OF RADIANT TEMPERATURE DIFFERENCE TRANSMISSION

CHEN Li-Xue

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The conception and mathematical transfer model in uniform medium of radiant temperature difference transmission were given by means of the analysis of radiant energy transmission link in thermal imaging systems.

Key words radiant temperature difference, transmittance, thermal imaging system, telescope system.