9(1990), 5:365~376

红外研究
Chin. J. Infrared Res.

星载红外分光计在空间甚长工作寿命
II. 计算结果

张肇先

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——本文对文献 [1] 中的公式作了改进，使之更接近于 TIROS-N 和 NOAA 卫星上的 HIRS 仪器的实际情况. 在光学元件和输出电压存在测量误差的条件下进行了系统的模拟计算. 结果表明，不论对 290 K 暖黑体还是对 265 K 冷黑体，也不论黑体是否受沾污或者受损伤，当仪器的输出电压下降到初始值的 80% 以内时，黑体辐射功率测值的恢复误差可以小于 0.9%，大多数小于 0.4%.

关键词——分光计，光学沾污，大气探测.

1. 引　　言

大幅度延长星载红外分光计在空间的工作寿命(譬如说十年以上)是具有重要的实用价值和经济意义的问题. 其解决途径是正确地给出空间校准曲线以及建立该曲线与地面校准曲线之间的关系. 在文献[1]中，首先从数学变换的观点出发建立了测值恢复方程式，继而从物理观点出发建立了星载红外分光计的工作方程式和空间校准方程式. 根据上述公式可以把红外分光计在元件性能退化后不准确的大气辐射率测值恢复为具有在地面校准时精度的准确数值.

本文对文献 [1] 中给出的工作方程和空间校准方程加以改进和完善，使之更接近于 TIROS-N 和 NOAA 卫星上的高分辨率红外辐射探测仪 HIRS 仪器的实际情况，并且对仪器各光学元件的有关参数的测量误差以及输出电压量化误差对机内黑体辐射功率测值的恢复误差的影响进行了估算. 在此基础上根据仪器各元件有关参数的可能变化范围进行系统的模拟计算，以给出机内黑体辐射功率 w_{33} 或 w_{23} 测值恢复精度相应的变化范围，并对仪器各元件参数的测量误差给出限制范围. 最后，对本方法的效能进行了讨论.

本文 1990 年 2 月 26 日收到.

2. 改进的工作方程式和空间校准方程式

由美国 TIROS-N 卫星及 NOAA 卫星系列携带的高分辨率红外辐射探测仪(HIRS)的长波红外光路如图 1 所示. 为了简单起见, 中继光学系统的几个光学元件统一用一个部件表示. 虽然本文采用模拟计算的方法进行研究, 但并不影响研究结论. 对 HIRS 的短波红外和可见光光路, 只要在公式中令与长波红外-短波红外和可见光分色片有关的项等于零并且令此分色片的透过率等于 1 也就能够适用.

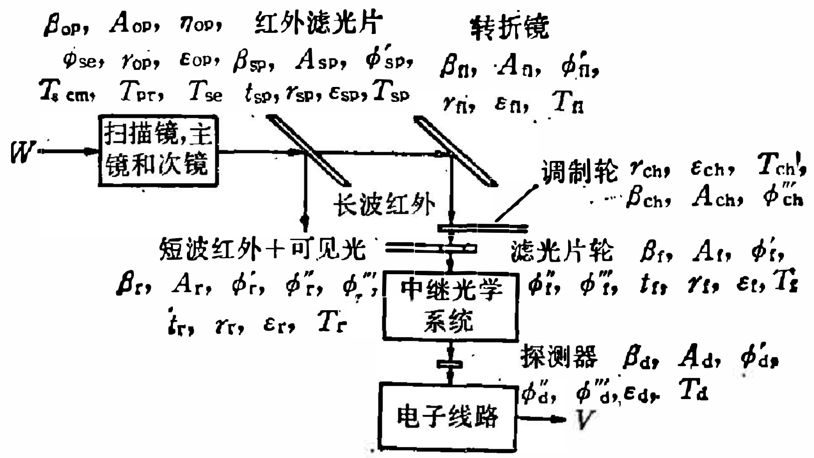

图 1 高分辨率红外辐射探测仪(HIRS)的长波红外光路示意图

Fig. 1 Block diagram of the LW IR optical parts of High Resolution Infrared Radiation Sounder(HIRS).

当分光计看景物时, 到达探测器上的辐射功率为

$$
\begin{aligned}
W_{sc}= & \beta_W \eta_{op} r_{op}^3 t_{sp} r_{fl} t_f t_r W \\
& +\beta_{op} \phi'_{se} \varepsilon_{op}[\eta_{op} A_{op} r_{op}^2 R(T_{scm})+\eta_{op} A_{op} r_{op} R(T_{pr})+A_{se} R(T_{se})] \varkappa_{op} t_{sp} r_{fl} t_f t_r \\
& +\beta_{sp} A_{sp} \phi'_{sp} \varepsilon_{sp} R(T_{sp}) \varkappa_{sp} r_{fl} t_f t_r+\beta_{fl} A_{fl} \phi'_{fl} \varepsilon_{fl} R(T_{fl}) \varkappa_{fl} t_f t_r \\
& +\beta_f A_f \varepsilon_f R(T_f)[\phi'_f(1+\mu_8 t_f t_r+\cdots) r_{op} t_{sp}^2 r_{fl}^2 t_f t_r+\phi''_f(t_r+\mu_9 r_f t_r r_r+\cdots)] \\
& +\beta_r A_r \varepsilon_r R(T_r)[\phi'_r(1+\mu_{10} r_f r_r+\cdots) r_{op} t_{sp}^2 r_{fl}^2 t_f^2 t_r+\phi''_r(1+\mu_{11} r_f t_r+\cdots)] \\
& +\beta_d A_d \varepsilon_d R(T_d)[\phi'_d(r_{op} t_{sp}^2 r_{fl}^2 t_f^2 t_r^2+\cdots)+\phi''_d(r_r+\mu_{12} r_f t_r^2+\cdots)],
\end{aligned} \tag{1}
$$

当分光计看调制器, 即测量参考时, 到达探测器上的辐射功率为

$$
\begin{aligned}
W_{ref}= & \beta_{ch} A_{ch} \phi'''_{ch} \varepsilon_{ch} R(T_{ch}) \varkappa_{ch} t_f t_r \\
& +\beta_f A_f \varepsilon_f R(T_f)[\phi'''_f(1+\mu_{15} t_f r_r+\cdots) r_{ch} t_f t_r+\phi''_f(t_r+\mu_9 r_f t_r r_r+\cdots)] \\
& +\beta_r A_r \varepsilon_r R(T_r)[\phi'''_r(1+\mu_{16} r_f r_r+\cdots) r_{ch} t_f^2 t_r+\phi''_r(1+\mu_{11} r_f t_r+\cdots)] \\
& +\beta_d A_d \varepsilon_d R(T_d)[\phi'''_d(r_{ch} t_f^2 t_r^2+\cdots)+\phi''_d(r_r+\mu_{12} r_f t_r^2+\cdots)].
\end{aligned} \tag{2}
$$

在本文中使用的符号除与文献[1]中相同外, 增加了下列符号:

fl 为转折镜, p 为污染膜, pr 为主镜, q 为光学元件被沾污部份占总面积的百分比, scm 为扫描镜, se为次镜, sp为分色片, η_{op}为扫描镜或主镜的有效面积占其总面积的百分比, ϕ' 为光学元件直接或被次镜反射后经过调制器看探测器的立体角, ϕ'' 为光学元件不经过调制器

直接看探测器的立体角，ϕ''' 为光学元件到调制器再反射回来看探测器的立体角，μ 为光学元件沿多次反射路径看探测器的立体角相对于沿直接路径或经过一次反射以后看探测器的立体角的减小因子.

由式(1)和(2)可得 HIRS 的工作方程:

$$v=\mathscr{R}\theta(W_{sc}-W_{ref})=\mathscr{R}\theta\, t_f t_r \gamma, \tag{3}$$

其中，

$$\gamma=\beta_W \eta_{op} r_{op}^3 t_{sp} r_{fl} W+\gamma_o, \tag{4}$$

$$\gamma_o=\gamma_{op}+\gamma_{sp}+\gamma_{fl}+\gamma_{ch}+\gamma_f+\gamma_r+\gamma_d, \tag{5}$$

$$\gamma_{op}=\beta_{op}\eta_{op}A_{op}\phi'_{se}\varepsilon_{op}\left[r_{op}^2 R(T_{scm})+r_{op}R(T_{pr})+\frac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}}R(T_{se})\right]t_{sp}r_{fl}\varkappa_{op}, \tag{6}$$

$$\gamma_{sp}=\beta_{sp}A_{sp}\phi'_{sp}\varepsilon_{sp}R(T_{sp})r_{fl}\varkappa_{sp}, \tag{7}$$

$$\gamma_{fl}=\beta_{fl}A_{fl}\phi'_{fl}\varepsilon_{fl}R(T_{fl})\varkappa_{fl}, \tag{8}$$

$$\gamma_{ch}=-\beta_{ch}A_{ch}\phi'''_{ch}\varepsilon_{ch}R(T_{ch})\varkappa_{ch}, \tag{9}$$

$$\gamma_f=\beta_f A_f \varepsilon_f R(T_f)\varkappa_f, \tag{10}$$

$$\gamma_r=\beta_r A_r \varepsilon_r t_f R(T_r)\varkappa_r, \tag{11}$$

$$\gamma_d=\beta_d A_d \varepsilon_d t_f t_r R(T_d)\varkappa_d; \tag{12}$$

并且，

$$\varkappa_{op}=1+\mu_1 r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f+\mu_2 r_{op}^2 t_{sp}^4 r_{fl}^4 r_f^2+\mu_3 r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2 t_f^2 r_r+\cdots, \tag{13}$$

$$\varkappa_{sp}=1+\mu_4 r_{op}t_{sp}+\mu_5 r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f+\cdots, \tag{14}$$

$$\varkappa_{fl}=1+\mu_6 r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}+\mu_7 r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f+\cdots, \tag{15}$$

$$\varkappa_{ch}=1+\mu_{13} r_{ch}r_f+\mu_{14} r_{ch}t_f^2 r_r+\cdots, \tag{16}$$

$$\varkappa_f=(1+\mu_8 t_f r_r)\phi'_f r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2-(1+\mu_{15} t_f r_r)\phi'''_f r_{ch}+\cdots, \tag{17}$$

$$\varkappa_r=(1+\mu_{10} r_f r_r)\phi'_r r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2-(1+\mu_{16} r_f r_r)\phi'''_r r_{ch}+\cdots, \tag{18}$$

$$\varkappa_d=\phi'_d r_{op}t_{sp}^2 r_{fl}^2-\phi'''_d r_{ch}+\cdots. \tag{19}$$

把式(3)运用于分光计分别看机内黑体和 $4K$ 冷空间的情况，可得到工作方程的另一形式:

$$\frac{v_{33}}{v_{31}}=1+\frac{r_{op}^3 w_{32}}{A_{op}\phi'_{sc}\left[r_{op}^2 R(T_{scm})+r_{op}R(T_{pr})+\frac{A_{se}}{A_{op}}R(T_{se})\right](1+\xi_2)(1+\xi_4)(1-r_{op})}, \tag{20}$$

式(4)中 ξ_2 和 ξ_4 分别见式(38)和式(40).

对式(4)等号两端取对数求微分，考虑分光计看 $4K$ 冷空间进行空间校准的情况，并且在实际计算中令 $\beta=1$，则

$$\begin{aligned}\frac{dv_{33}}{v_{33}}=\frac{dv_{31}}{v_{31}}+\frac{\eta_{op}r_{op}^3 t_{sp}r_{fl}w_{33}}{\gamma\gamma_0}\Big(&\gamma_0\frac{dw_{33}}{w_{33}}+\pi_{op}\frac{dr_{op}}{r_{op}}+\pi_{sp}\frac{dt_{sp}}{t_{sp}}\\&+\pi_{fl}\frac{dr_{fl}}{r_{fl}}+\pi_{ch}\frac{dr_{ch}}{r_{ch}}+\pi_f\frac{dt_f}{t_f}+\pi'_f\frac{dr_f}{r_f}+\pi_r\frac{dt_r}{t_r}\\&+\pi'_r\frac{dr_r}{r_r}+\pi_d\frac{dr_d}{r_d}+\pi_T\Big),\end{aligned} \tag{21}$$

这里，

$$
\begin{aligned}
\pi_{op}=3\gamma_o&+\frac{\gamma_{op}\tau_{op}}{\varepsilon_{op}}-\frac{\gamma_{op}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_{op}}(\mu_1\tau_f+2\mu_2\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f^2+\mu_3t_f^2\tau_r)\\
&-\frac{\gamma_{op}[2\tau_{op}^2R(T_{scm})+\tau_{op}R(T_{pr})]}{\tau_{op}^2R(T_{scm})+\tau_{op}R(T_{pr})+\dfrac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}}R(T_{se})}-\frac{\gamma_{sp}\tau_{op}t_{sp}}{\varkappa_{sp}}(\mu_4+\mu_5\tau_{op}t_{sp}\tau_{fl}^2\tau_f)\\
&-\frac{\gamma_{fl}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}}{\varkappa_{fl}}(\mu_6+\mu_7\tau_{fl}\tau_f)-\frac{\gamma_f\phi_f'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_f}(1+\mu_8t_f\tau_r)\\
&-\frac{\gamma_r\phi_r'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_r}(1+\mu_{10}\tau_f\tau_r)-\frac{\gamma_d\phi_d'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_d},
\end{aligned}
\tag{22}
$$

$$
\begin{aligned}
\pi_{sp}=\gamma_o&+\frac{\gamma_{sp}t_{sp}}{\varepsilon_{sp}}-\frac{2\gamma_{op}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_{op}}(\mu_1\tau_f+2\mu_2\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f^2+\mu_3t_f^2\tau_r)-\gamma_{op}\\
&-\frac{\gamma_{sp}\tau_{op}t_{sp}}{\varkappa_{sp}}(\mu_4+2\mu_5t_{sp}\tau_{fl}^2\tau_f)-\frac{2\gamma_{fl}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}}{\varkappa_{fl}}(\mu_6+\mu_7\tau_{fl}\tau_f)\\
&-\frac{2\gamma_f\phi_f'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_f}(1+\mu_8t_f\tau_r)-\frac{2\gamma_r\phi_r'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_r}(1+\mu_{10}\tau_f\tau_r)\\
&-\frac{2\gamma_d\phi_d'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_d},
\end{aligned}
\tag{23}
$$

$$
\pi_{sp}'=\frac{\gamma_{sp}\tau_{sp}}{\varepsilon_{sp}},
\tag{24}
$$

$$
\begin{aligned}
\pi_{fl}=\gamma_o&+\frac{\gamma_{fl}\tau_{fl}}{\varepsilon_{fl}}-\frac{2\gamma_{op}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_{op}}(\mu_1\tau_f+2\mu_2\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f^2+\mu_3t_f^2\tau_r)-\gamma_{op}\\
&-\frac{2\gamma_{sp}\mu_5\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f}{\varkappa_{sp}}-\gamma_{sp}-\frac{\gamma_{fl}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}}{\varkappa_{fl}}(\mu_6+2\mu_7\tau_{fl}\tau_f)\\
&-\frac{2\gamma_f\phi_f'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\tau_{fl}}(1+\mu_8t_f\tau_r)-\frac{2\gamma_r\phi_r'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_r}(1+\mu_{10}\tau_f\tau_r)\\
&-\frac{2\gamma_d\phi_d'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2}{\varkappa_d},
\end{aligned}
\tag{25}
$$

$$
\begin{aligned}
\pi_{ch}=&\frac{\gamma_{ch}\tau_{ch}}{\varepsilon_{ch}}-\frac{\gamma_{ch}\tau_{ch}}{\varkappa_{ch}}(\mu_{13}\tau_f+\mu_{14}t_f^2\tau_r)+\frac{\gamma_f\phi_f'''\tau_{ch}}{\varkappa_f}(1+\mu_{15}t_f\tau_r)\\
&+\frac{\gamma_r\phi_r'''\tau_{ch}}{\varkappa_r}(1+\mu_{16}\tau_f\tau_r)+\frac{\gamma_d\phi_d'''\tau_{ch}}{\varkappa_d},
\end{aligned}
\tag{26}
$$

$$
\begin{aligned}
\pi_f=&-\frac{2\gamma_{op}\mu_3\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2t_f^2\tau_r}{\varkappa_{op}}-\frac{2\gamma_{ch}\mu_{14}\tau_{ch}t_f^2\tau_r}{\varkappa_{ch}}+\frac{\gamma_ft_f}{\varepsilon_f}\\
&-\frac{\gamma_ft_f\tau_r}{\varkappa_f}(\mu_8\phi_f'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2-\mu_{15}\phi_f'''\tau_{ch})-\gamma_d,
\end{aligned}
\tag{27}
$$

$$
\begin{aligned}
\pi_f'=&-\frac{\gamma_{op}\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f}{\varkappa_{op}}(\mu_1+2\mu_2\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f)-\frac{\gamma_{sp}\mu_5\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f}{\varkappa_{sp}}\\
&-\frac{\gamma_{fl}\mu_7\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2\tau_f}{\varkappa_{fl}}-\frac{\gamma_{ch}\mu_{13}\tau_{ch}\tau_f}{\varkappa_{ch}}+\frac{\gamma_f\tau_f}{\varepsilon_f}\\
&-\frac{\gamma_r\tau_f\tau_r}{\varkappa_r}(\mu_{10}\phi_r'\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2-\mu_{16}\phi_r'''\tau_{ch}),
\end{aligned}
\tag{28}
$$

$$
\pi_r=\frac{\gamma_rt_r}{\varepsilon_r}-\gamma_d,
\tag{29}
$$

$$
\pi_r'=-\frac{\gamma_{op}\mu_3\tau_{op}t_{sp}^2\tau_{fl}^2t_f^2\tau_r}{\varkappa_{op}}-\frac{\gamma_{ch}\mu_{14}\tau_{ch}t_f^2\tau_r}{\varkappa_{ch}}
$$

$$-\frac{\gamma_f t_f r_r}{\varkappa_f}(\mu_8 \phi_f' r_{op} t_{sp}^2 r_{fl}^2 - \mu_{15}\phi_f''' r_{ch}) + \frac{\gamma_r r_r}{\varepsilon_r}$$

$$+\frac{\gamma_r r_f r_r}{\varkappa_r}(\mu_{10}\phi_r' r_{op} t_{sp}^2 r_{fl}^2 - \mu_{16}\phi_r''' r_{ch}), \tag{30}$$

$$\pi_d = \frac{r_d}{\varepsilon_d}, \tag{31}$$

$$\pi_T = -\bar{\gamma}_{op}\frac{r_{op}^2 dR(T_{scm}) + r_{op} dR(T_{pr}) + \frac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}} dR(T_{se})}{r_{op}^2 R(T_{scm}) + r_{op} R(T_{pr}) + \frac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}} R(T_{se})}$$

$$-\bar{\gamma}_{sp}\frac{dR(T_{sp})}{R(T_{sp})} - \bar{\gamma}_{fl}\frac{dR(T_{fl})}{R(T_{fl})} - \bar{\gamma}_{ch}\frac{dR(T_{ch})}{R(T_{ch})} - \bar{\gamma}_f\frac{dR(T_f)}{R(T_f)}$$

$$-\bar{\gamma}_r\frac{dR(T_r)}{R(T_r)} - \bar{\gamma}_d\frac{dR(T_d)}{R(T_d)}. \tag{32}$$

在式(21)～(32)中，γ 表达式应该采用下式代替式(4)：

$$\gamma = \eta_{op} r_{op}^3 t_{op} r_{fl} w_{33} + \gamma_o \tag{33}$$

其中，机内黑体辐射功率为

$$w_{33} = A_{op}\phi_{op}\varepsilon_b R(T_b), \tag{34}$$

$$\varepsilon_b = 1 - \zeta(1-\varepsilon_{bp}). \tag{35}$$

在式(32)中，π_T 表示 HIRS 各光学元件的温度变化对输入电压变化的贡献．横线表示平均值．由于 γ_{op} 值远大于其它光学元件的 $\bar{\gamma}$ 值，并且在本文的计算中考虑

$$T_{scm} = T_{pr} = T_{se} \approx T_{sp} \approx T_{fl}$$

则，

$$\pi_T \approx -\bar{\gamma}_{op}\frac{\Delta R(T_{se})}{R(T_{se})}. \tag{36}$$

令

$$\xi_1 = \left(\pi_{sp}\frac{dt_{sp}}{t_{sp}} + \pi_{fl}\frac{dr_{fl}}{r_{fl}} + \pi_{ch}\frac{dr_{ch}}{r_{ch}} + \pi_f\frac{dt_f}{t_f} + \pi_f'\frac{dr_f}{r_f}\right.$$

$$\left. + \pi_r\frac{dt_r}{t_r} + \pi_r'\frac{dr_r}{r_r} + \pi_d\frac{dr_d}{r_d}\right)\Big/\left(\pi_{op}\frac{dr_{op}}{r_{op}}\right), \tag{37}$$

$$\xi_2 = (\gamma_o - \gamma_{op})/\gamma_{op}, \tag{38}$$

$$\xi_3 = \left(\pi_{op} - 3\gamma_o - \frac{\gamma_o r_{op}}{\varepsilon_{op}}\right)\Big/(3\gamma_o), \tag{39}$$

$$\xi_4 = \varkappa_{op} - 1, \tag{40}$$

$$c = \frac{A_{op}\phi_s'}{\bar{w}_{33}}\left[\bar{r}_{op}^2\bar{R}(T_{scm}) + \bar{r}_{op}\bar{R}(T_{pr}) + \frac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}}\bar{R}(T_{se})\right](1+\xi_2)(1+\xi_4), \tag{41}$$

$$\gamma_{op}' = A_{op}\phi_{sc}'\left[r_{op}^2 R(T_{scm}) + r_{op} R(T_{pr}) + \frac{1-\eta_{op}}{\eta_{op}} R(T_{se})\right](1+\xi_4)(1-r_{op}). \tag{42}$$

把式(21)等号两端分成 K 段积分，最后得到空间校准方程式：

$$w_{33} \equiv w_k = w_{k-1}\left\{\frac{v_{33}v_{21}}{v_{23}v_{31}}\left(\frac{1-r_{op}}{1-r_{op}^0}\right)^{\frac{1+\xi_1}{1+\xi_3}}\exp\left[\frac{\Delta R(T_{se})}{R(T_{se})}\frac{1}{1+\xi_2+\frac{\gamma_{op}'}{r_{op}^3 w_{33}}}\right]\right.$$

$$\left.\times\left(\prod_{i=1}^{k-1}U_i^{u_i}\prod_{i=1}^{k}X_i^{x_i}Y_i^{y_i}Z_i^{z_i}\right)^{-1}\right\}^{1/u_k}. \tag{43}$$

其中，U_i, u_i, X_i, x_i, Y_i, y_i, Z_i, z_i 的表达式见文献[1].

3. 计 算 方 法

HIRS 仪器有很多元件，它们众多的光学参数不可能全部用数学方法实时确定．必须把待求的参数减少为 2 个，才可能利用工作方程和空间校准方程确定．本文的待求量是 w_{33}. 由于扫描镜、主镜和次镜的热辐射对输出电压的贡献(γ_{op})远大于其它光学元件的贡献(γ_{sp}, γ_{fl}, …, γ_d)之和与 γ_{op} 的比值(见式(38))为 $|\xi_2|<0.08$, 由此可以确定 r_{op} 为另一个待求量，并可假设黑体和其它光学元件受到的沾污程度由 r_p 和 q_{op} 描写，与扫描镜、主镜和次镜相同.

下面建立各光学元件受沾污过程的数学模型．比较完整的模型应包含 2 个参数，即污染膜的反射率 r_p 和光学元件被沾污部份占总面积的百分比 q_{op}. 被沾污的扫描镜或主镜或次镜的的光学参数为

$$r_{op}=(1-q_{op})r^0_{op}+q_{op}r_p+q_{op}r^0_{op}(1-r_p)^2, \tag{44}$$

$$\varepsilon_{op}=1-r_{op}. \tag{45}$$

被沾污的光学滤光片的光学参数为

$$t_f=(1-q_{op})t^0_f+q_{op}(1-r_p)^2t^0_f, \tag{46}$$

$$r_f=(1-q_{op})r^0_f+q_{op}r_p+r^0_fq_{op}(1-r_p)^2, \tag{47}$$

$$\varepsilon_f=1-t_f-r_f. \tag{48}$$

其它反射元件和透射元件的光学参数表达式分别与式(44)～(48)类似．对于机内黑体，则除了 r_p 和 q_b 以外，还应考虑黑漆老化或损伤产生的黑漆比辐射率的减小因子 λ_b. 于是黑漆的比辐射率表达式为

$$\varepsilon_{bp}=1-(1-\varepsilon^0_{bp}\lambda_b)(1-q_b)-q_br_p-q_b(1-\varepsilon^0_{bp}\lambda_b)(1-r_p)^2. \tag{49}$$

根据上述沾污模型，按照式(3)和式(34)以及其它有关公式，可以模拟计算出相应于各种玷污及损伤情况(即不同的 r_p, q_{op}, λ_b)的输出电压 v_{21}, v_{23}, v_{31}, v_{33}.

为了从扫描镜或主镜或次镜的反射率 r_{op} 估计污染膜的反射率 r_p, 只能近似采用仅包含 1 个参数 r_p 的均匀沾污模型:

$$r_{op}=r_p+r^0_{op}(1-r_p)^2, \tag{50}$$

$$t_f=t^0_f(1-r_p)^2. \tag{51}$$

其它光学元件的反射率和透过率分别与式(50)和(51)类似．由式(50)解出

$$r_p=\frac{2r^0_{op}-1-\sqrt{(2r^0_{op}-1)^2-4r^0_{op}(r^0_{op}-r_{op})}}{2r^0_{op}}\qquad(r_{op}\geqslant 0.7423), \tag{52}$$

可用以估计污染膜的反射率．利用式(44)～(48)可以估计各光学元件被玷污以后的光学性能.

工作方程和空间校准方程都是复杂的超越方程．因此，必须使用迭代法求解 w_{33}. 如前所述，在计算中，取 $T_{scm}=T_{pr}=T_{se}$, 并且虑考 $K=1$. 其计算过程如下:

(1) 以地面校准值 w_{23} 作为机内辐射功率 w_{33} 的初始值，给出扫描镜、主镜和次镜的

反射率 r_{op} 可能变化范围的两端值作为 r_{op} 的初始值;

(2) 按照式(50), (51)和(52)估算其它光学元件的反射率 r, 透过率 t 以及比辐射率 ε; 进而再估算其它各参数, 如 γ、π 和 ξ;

(3) 按照式(43)估算 w_{33};

(4) 根据式(20)定义的公式, 计算出 $f(r)$ 值

$$f(r)=\gamma_0\left(\frac{v_{33}}{v_{31}}-1\right)-\eta_{op}r_{0p}^3t_{sp}r_{fl}w_{33}. \tag{53}$$

(5) 按照 0.618 方法确定新的 r_{op} 值变化范围的两端值, 重复第 2 步至第 4 步的计算, 直至

$$|f(r)|\leqslant\text{给定值}. \tag{54}$$

为了提高测值的恢复精度, 还找到一种改进算法. 即在第(2)步中令

$$\xi'_j=\rho\xi_j^0+(1-\rho)\xi_j,\quad (j=1, 2, \cdots, 5);$$

并且,

$$\xi'_5=(1+\xi_1)/(1+\xi_2), \tag{55}$$

其中 ρ 为修正系数. 对应于每一种玷污情况(即某个 r_p 值和 q_{op} 值)算得一个 ρ 值, 使 $\delta w_{33}=0$. 这样可得到一组数据, 并求得其拟合曲线 $\rho(v_{33})$. 对应于 HIRS 仪器第 4 通道的 $\rho(v_{33})$ 如图 2 所示.

在模拟计算中对 r_p 和 q_{op} 采用各种可能的数值, HIRS 仪器各光学元件的初始参数取自文献[2].

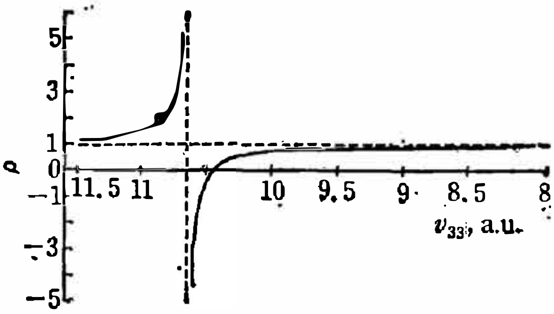

图 2　HIRS 第 4 通道的修正系数 $\rho(v_{33})$

Fig. 2　Modification coefficient $\rho(v_{33})$ for channel 4 of HIRS.

4. 结　　果

4.1　各光学参数无测量误差时的测值恢复误差

如果 HIRS 各元件的光学参数是准确的, 那么, 290 K 机内暖黑体辐射功率 w_{33} 的测值恢复误差(百分率)如图 3 所示. 这是对第 4 通道($\nu=703\,\text{cm}^{-1}$, $\Delta\nu=16\,\text{cm}^{-1}$)作模拟计算的结果. 曲线 a 表示在机内黑体的性能没有变化($q_b=0$, $\lambda_b=1$) 的条件下使用普通算法的测值恢复误差计算值$|\delta w_{33}|$; 曲线 b, c 和 d 表示在机内黑体完全受沾污($q_b=1$)并且其辐射性能有不同程度的下降(分别为 $\lambda_b=1$, 0.9, 0.8)的条件下使用改进算法的测值恢复误差计算值. 值得注意的是曲线 b, c, d, 在 $v_{33}=10.65$ 附近 δw_{33} 出现急剧的变化, 此现象与图 2 中的 $\rho(v_{33})$ 的奇异点相对应. 为了减小测值恢复误差, 在 $v_{33}=10.4\sim10.9$ 区间内采用普通算法计算值和改进算法计算的平均值作为 w_{33} 的测量恢复值.

4.2　各光学参数测量误差对测值恢复的影响

影响测值恢复的因素有:

(1) 扫描镜、主镜和次镜反射率初始值的测量误差 $\delta r_{op}^0(\%)$; (2) 扫描镜、主镜和次镜的实时温度测量误差 ΔT_{op}(K); (3) 其它光学元件的贡献由于实时温度和光学参数初始测值不准确, 以及对其相互作用的不准确估计产生的误差

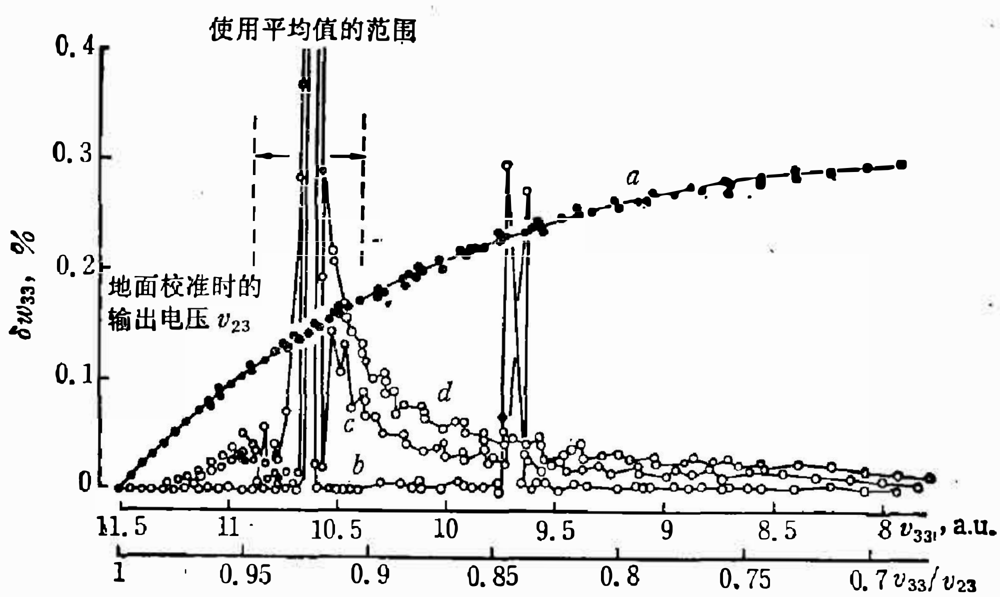

图3　在没有测量误差条件下,HIRS对应于第4通道的机内黑体辐射功率测值的恢复误差$|\delta w_{33}|$

Fig. 3　Restoration errors $|\delta w_{33}|$ of the radiant power of the internal blackbody for channel 4 of HIRS under the condition without measurement errors.

$$\sum\delta\gamma=\delta\gamma_{sp}+\delta\gamma_{fl}+\cdots+\delta\gamma_{d}(\%);$$

(4) 输出电压的13位量化误差.

它们在$q_b=1$和$\lambda_b=0.8$的条件下引起的测值恢复误差δw_{33}如图4~7所示.可见δr^0_{op}对测值恢复误差δw_{33}的影响随仪器性能退化程度的增加而明显增加;反之,$\sum\delta\gamma$的影响则明显减小. 输出电压的13位量化误差是随机的.

从当前技术水平出发,可以要求扫描镜、主镜和次镜的反射率测量误差都不大于0.1%,其温度测量误差不大于0.3K;其它元件的光学参数测量误差不大于1%,其温度测量误差不大于0.5~1K,从而可以把$\sum\delta\gamma$限制在2%以内.

由于HIRS的信息传输格式早已是固定的.这里只考虑使用13位传输测量信息.

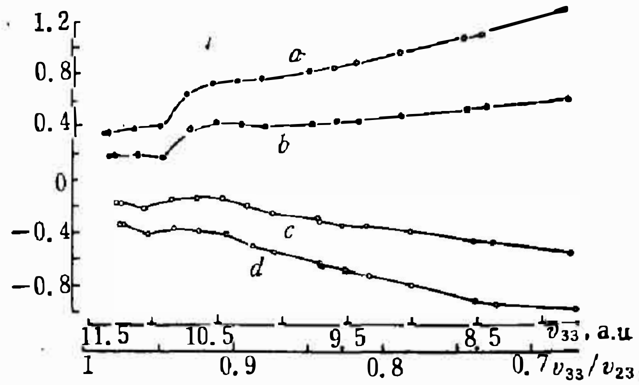

图4　扫描镜、主镜和次镜的反射率测量误差$\delta\gamma^0_{op}$引起的恢复误差δw_{33}

(a、b、c和d分别表示$\delta r^0_{op}=+0.2\%$、$+0.1\%$、-0.1%、-0.2%)

Fig. 4　Restoration errors δw_{33} caused by the reflectance measurement errors δr^0_{op} for the scanning, primary and secondary mirrors.

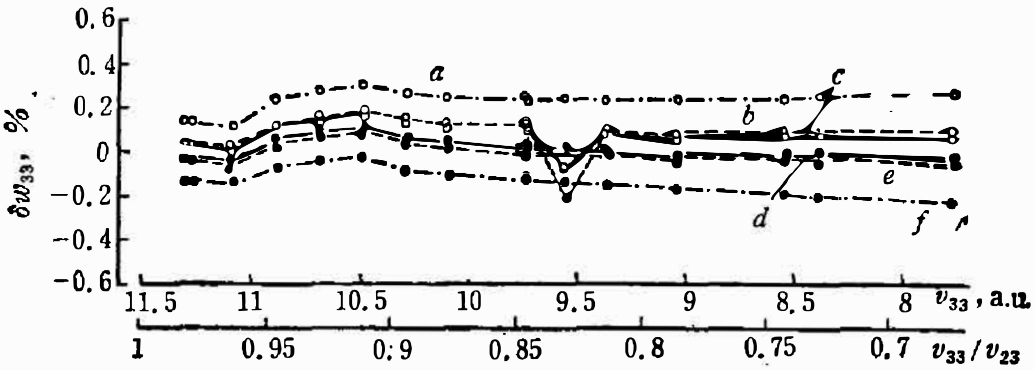

图 5　扫描镜、主镜和次镜的温度实时测量差误 $\varDelta T_{op}$ 引起的恢复误差 δw_{33}

(a、b、c、d, e 和 f 分别表示 $\varDelta T_{op}=-1$ K、-0.3 K、-0.2 K、$+0.2$ K、$+0.3$ K、$+1$ K)

Fig. 5　Restoration errors δw_{33} caused by the real-time temperature measurement errors $\varDelta T_{op}$ for the scanning, primary and secondary mirrors.

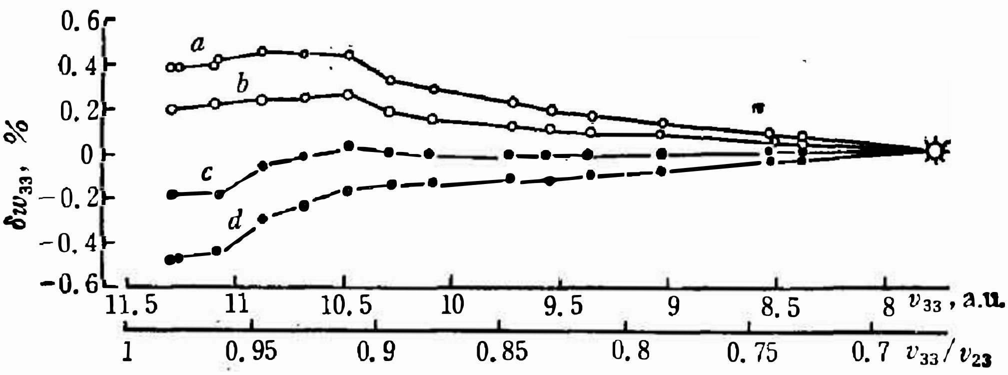

图 6　其它光学元件参数的测量误差和估计误差 $\sum\delta\gamma$ 引起的测量恢复误差 δw_{33}

a、b、c 和 d 分别表示 $\sum\delta\gamma=-5\%$、-2%、$+2\%$、$+5\%$

Fig. 6　Restoration errors δw_{33} caused by the measurement and estimation errors $\sum\delta\gamma$ of parameters for other optical parts.

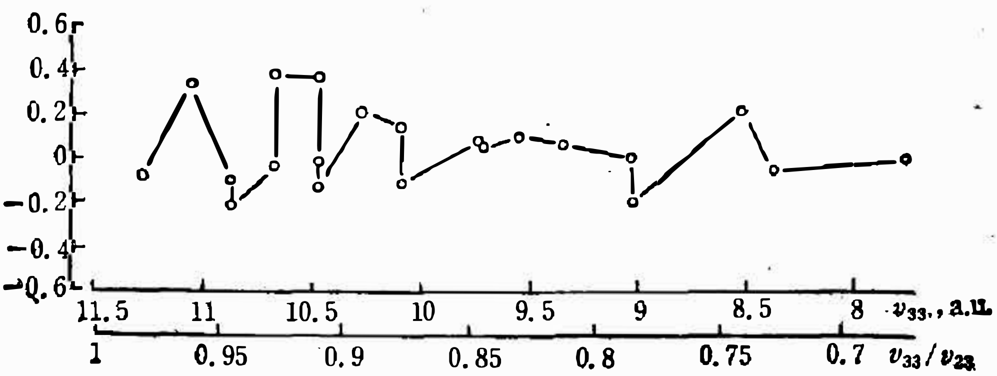

图 7　输出电压 13 位量化误差引起的恢复误差 δw_{33}

Fig. 7　Restoration errors caused by the 13 bits quantization errors of the output voltages.

4.3 模拟计算结果

根据前面对影响测值恢复的四个因素规定的误差范围，可以组合成八种情况进行模拟计算得到一组数据. 其中,对每一种情况，分别使 $r_p=0$, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04; 并且 $q_{op}=0$, 0.1, …, 0.9, 1.0.

在本文中只对第 4 通道进行研究. 依次考虑分光计使用 290 K 和 265 K 机内黑体进行校准的情况. 分别对黑体完好如初($q_b=0$, $\lambda_b=1$)和黑体完全被玷污($q_b=1$)并且黑漆比辐射率下降到 $\lambda_b=0.8$ 时的情况进行模拟计算. 在 $q_b=1$ 和 $\lambda_b=0.8$ 的情况下，黑体辐射功率比在地面校准时下降 2% 左右. 当 HIRS 光学系统未受玷污时，由于测量误差，不论对 290 K 黑体还是对 265 K 黑体,不论黑体性能是否退化,w_{33} 的恢复误差都不超过 0.3%. 计算结果的统计分析见表 1 和表 2. 不论是哪一个黑体,也不论黑体性能如何变化，在 HIRS 性能退化的前期($v_{33}/v_{23}>80\%$)，$|\delta w_{33}|$ 的统计分布都是基本一样的,$|\delta w_{33}|$ 一般均小于 0.9%,其中有 75% 可小于 0.4%.

表 1 290 K 黑体辐射功率测量恢复误差 $|\delta w_{33}|$ 模拟计算结果的统计分析(出现概率%)

Table 1 Simulated calculation and statistics of the restoration error $|\delta w_{33}|$ of 290K blackbody radiant power (occurrence probability%).

$|\delta w_{33}|$ (%)	黑体性能正常 ($q_b=0$, $\lambda_b=1$)		黑体性能退化 ($q_b=1$, $\lambda_b=0.8$)	
	$v_{33}>9.2$ ($v_{33}/v_{23}>80\%$)	$v_{33}<9.2$ ($v_{33}/v_{23}<80\%$)	$v_{33}>9.2$ ($v_{33}/v_{23}>80\%$)	$v_{33}<9.2$ ($v_{33}/v_{23}<80\%$)
>0.8	0.6	11.2	0	11.1
0.4~0.8	22.0	64.4	25.6	55.6
0~0.4	77.4	24.4	74.4	33.3

表 2 265 K 黑体辐射功率测值恢复误差 $|\delta w_{32}|$ 模拟计算结果的统计分析(出现概率%)

Table 2 Simulated calculation and statistics of the restoration error $|\delta w_{32}|$ of 265K blackbody radiant power (occurrence probability%).

$|\delta w_{32}|$ (%)	黑体性能正常 ($q_b=0$, $\lambda_b=1$)		黑体性能退化 ($q_b=1$, $\lambda_b=0.8$)	
	$v_{32}>6.6$ ($v_{32}/v_{22}>80\%$)	$v_{32}<6.6$ ($v_{32}/v_{22}<80\%$)	$v_{32}>6.6$ ($v_{32}/v_{22}>80\%$)	$v_{32}<6.6$ ($v_{32}/v_{22}<80\%$)
>0.8	1.3	31.3	2.0	27.4
0.4~0.8	25.6	35.4	25.2	32.3
0~0.4	73.1	33.3	72.8	40.3

5. 讨论和结论

对影响测值恢复精度的四个因素进行分析，可以寻求出进一步提高测值恢复精度的途径. 主要应该减小扫描镜、主镜和次镜反射率初始值的测量误差 δr^0_{op} 以及输出电压的量化误差. 对于量化误差，由于它是随机的，可以利用 HIRS 的19 个红外通道求得的不同波段的 w_{33} 数据把它的大部份影响消除掉. 这样，有可能使测值恢复误差进一步减小.

如上所述，在本文中只给出第 4 通道的结果. 其它长波红外通道(6.3～15 μm)的结果应该是极为类似的. 至于短波红外通道(3.7～4.6 μm)，由于少了一块光学元件，并且仪器内部的温度在 300 K 左右，光学元件对测量值恢复的影响减小. 从而使短波红外通道的测值恢复精度不低于长波红外通道.

通过文献[1]和本文的研究，可以得出下列结论:

(1) 本文提出的用测量值恢复星载红外分光计(如 HIRS)测量大气辐射率的准确值以大幅度延长分光计在空间的工作寿命的方法是可行的.

(2) 本方法可以消除电路增益和探测器响应率(不包括探测率 D^*) 发生变化引起的分光计性能退化的影响.

(3) 在本文第 4 节给出的测量精度条件下，当输出电压没有下降到原有值的 80% 时，机内黑体辐射功率的测量值恢复精度小于 0.9%，其中有 75% 小于 0.4%. 当仪器性能没有退化时，测值恢复误差在 0.3% 以下. 如能设法减小输出电压量化误差的影响，则有可能把测值恢复精度进一步提高.

(4) 采用本方法可以确定 265 K 黑体的辐射功率，其恢复误差的范围与 290 K 黑体大体一致.

(5) 在本文中对 HIRS 仪器性能的数学描述与实际情况很接近. 但是在恢复实际测量值时，计算公式必须更加细致完善. 为了实现大幅度延长星载红外分光计在空间工作寿命的目的，还必须解决分光计和卫星的工艺和可靠性等问题.

参 考 文 献

[1] Zhang Zhao-Xien, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 21: 3497～3502.

[2] Koenig E. W. et al., "*High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) for the Nimbus F spacecraft*, Final report, Dec.1975, N76-21272.

VERY LONG LIFE OF SATELLITE-BORNE INFRARED SPECTROMETER IN SPACE. 2: RESULTSOF CALCULATION

ZHANG ZHAOXIAN
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academica Sinica, Shanghai, 200083, China)

ABSTRACT

The formulae in the author's previous paper are further improved to approach the real circumstances of the HIRS instrument on the satellites TIROS-N and NOAA. With measurement errors existing in the optical parts and output voltages, the simulative computations are made systematically. The results indicate that, when the output voltage of HIRS decreases to a value within 80% of its primary value; the restoration errors may be less than 0.9%, and for most of the data, less than 0.4% not only for the 290K warmer but also for the 265K colder blackbodies, whether or not for contaminated and/or deteriorated blackbodies.