

星载红外分光计在空间甚长工作寿命 III. 活动门方法

张 肇 先

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——讨论了在 TIROS-N 和 NOAA 卫星上的 HIRS-2 仪器中设置一个按指令打开或关闭并且涂黑的门, 在仪器性能严重退化的情况下把内部黑体辐射功率 w_{32} 和 w_{33} 测值恢复到原先精度的可能性。

关键词——分光计, 光学玷污, 大气探测。

1. 引 言

星载红外分光计在空间工作很长时间以后(如十年以上), 不论是光学系统、电子学系统和探测器还是它的内部黑体的性能都要退化, 从而使其测值不再具有原来的精度。为了延长其工作寿命, 我们提出了恢复测值精度的方法^[1, 2]。本文介绍另一种方法, 即以美国 NOAA 气象卫星上的高分辨率红外探测仪(HIRS-2)为例, 设想在其主光学系统和调制轮之间设置一个按指令控制打开或关闭的、不受玷污的活动门, 在门的探测器一面涂黑。

2. 工作方程

活动门打开时的情况与前一种方法^[1, 2]相同, 当 HIRS-2 仪器看景物或参考黑体即调制轮时, 探测器接收到的功率分别为 W_{sc} 和 W_{ref} 。其工作方程为

$$V = \mathcal{R} \mathcal{D} (W_{sc} - W_{ref}) = \mathcal{R} \mathcal{D} t_f t_r \gamma, \quad (1)$$

式(1)中, γ 的表达式以及包含于其中的参数 $\gamma_0, \gamma_{0p}, \gamma_{sp}, \dots, \gamma_i$ 和各个 x 的表达式与文献[2]中式(4)~(19)相同。当进行机内校准, 亦即探测器看机内黑体时, $W = w_{33}$, $V = v_{33}$; 此时的输出电压为

$$v_{33} = \mathcal{R} \mathcal{D} t_f t_r (\eta_{0p} \tau_{0p}^3 t_{sp} \tau_{fl} w_{33} + \gamma_0), \quad (2)$$

输入辐射功率为

$$w_{33} = A_{0p} \phi_{0p} \epsilon_b R(T_b). \quad (3)$$

当看 4K 冷空间时, $W \approx 0$, 其输出电压为

$$v_{31} = \mathcal{R} \delta t_f t_l \gamma_0. \quad (4)$$

把活动门关闭, 则工作方程变为

$$v^* = \mathcal{R} \delta t_f t_l \gamma^*. \quad (5)$$

式(5)中,

$$\gamma^* = \gamma_{md}^* + \gamma_{sp}^* + \gamma_{fl}^* + \gamma_{ch} + \gamma_f^* + \gamma_r^* + \gamma_d^*, \quad (6)$$

$$\gamma_{md}^* = \beta_{md} A_{md} \phi'_{md} \varepsilon_{md} R(T_{md}) t_{sp} r_f \kappa_{md}^*, \quad (7)$$

$$\gamma_{sp}^* = \beta_{sp} A_{sp} \phi'_{sp} \varepsilon_{sp} R(T_{sp}) r_{fl} \kappa_{sp}^*, \quad (8)$$

$$\gamma_{fl}^* = \beta_{fl} A_{fl} \phi'_{fl} \varepsilon_{fl} R(T_{fl}) \kappa_{fl}^*, \quad (9)$$

$$\gamma_f^* = \beta_f A_f \varepsilon_f R(T_f) \kappa_f^*, \quad (10)$$

$$\gamma_r^* = \beta_r A_r \varepsilon_r t_f R(T_r) \kappa_r^*, \quad (11)$$

$$\gamma_d^* = \beta_d A_d \varepsilon_d t_f t_r R(T_d) \kappa_d^*, \quad (12)$$

$$\kappa_{md}^* = 1 + \mu_1^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f + \mu_2^* r_{md}^2 t_{sp}^4 r_{fl}^4 r_f^2 + \mu_3^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 t_f^2 r_r + \dots, \quad (13)$$

$$\kappa_{sp}^* = 1 + \mu_4^* r_{md} t_{sp} + \mu_5^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f + \dots, \quad (14)$$

$$\kappa_{fl}^* = 1 + \mu_6^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl} + \mu_7^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 r_f + \dots, \quad (15)$$

$$\kappa_f^* = (1 + \mu_8^* t_f r_r) \phi_f^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 - (1 + \mu_{15} t_f r_r) \phi_f''' r_{ch} + \dots, \quad (16)$$

$$\kappa_r^* = (1 + \mu_{10} r_f r_r) \phi_r^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 - (1 + \mu_{16} r_f r_r) \phi_r''' r_{ch} + \dots, \quad (17)$$

$$\kappa_d^* = \phi_d^* r_{md} t_{sp}^2 r_{fl}^2 - \phi_d''' r_{ch} + \dots. \quad (18)$$

在式(5)~(18)中, 下标 md 表示活动门, 星号表示活动门关闭后的情况。

由式(5)和(4)以及式(2)和(4), 可求得

$$\frac{v^*}{v_{31}} = \frac{\gamma^*}{\gamma_0}, \quad (19)$$

$$w_{33} = \frac{\gamma_0}{\eta_{0p} r_{0p}^3 t_{sp} r_{fl}} \left(\frac{v_{33}}{v_{31}} - 1 \right). \quad (20)$$

采用一定的近似, 由式(19)可以很好地估计出扫描镜、主镜和次镜的反射率 r_{0p} , 再由式(20)求得内部黑体的辐射功率 w_{33} 。

3. 模拟计算

与文献[2]一样, 在 w_{32} 和 w_{33} 测值的恢复中, 可以把由各种原因引起仪器光学系统和黑体性能的退化看成等效于光学玷污引起的性能退化。在式(19)和(20)两个关系式中, 光学元件的参数很多, 必须进行合理的简化。考虑到扫描镜、主镜和次镜对输出电压的贡献 γ_{0p} 远大于其它光学系统元件的贡献, 假设

(1) 扫描镜、主镜、次镜和转折镜的反射率初始值相同, 皆为 r_{0p}^0 ;

(2) 每只反射元件, 以及黑体的一面或透射元件的两面均受到均匀的玷污;

(3) 所有光学元件和黑体都受到同样的玷污, 其污染膜的反射率皆为 r_p 。

这样, 在给出 r_p 值之后, 各光学元件的反射率 r 、透过率 t 和比辐射率 ε 就可根据下列式子确定:

$$r = r_p + r_0(1 - r_p)^2, \quad (21)$$

$$t = t_0(1 - r_p)^2 \quad (\text{透射元件}), \quad (22)$$

$$s = \begin{cases} 1 - r & (\text{反射元件}), \\ 1 - t - r & (\text{透射元件}). \end{cases} \quad (23)$$

由扫描镜、主镜和次镜的反射率表达式可解出

$$r_p = \frac{1}{2r_{0p}^0} [2r_{0p}^0 - 1 - \sqrt{(2r_{0p}^0 - 1)^2 - 4r_{0p}^0(r_{0p}^0 - r_{0p})}], \quad (r_{0p} \geq 0.7423) \quad (24)$$

对于内部黑体还考虑受损伤和老化的程度用 $\lambda_b(\%)$ 表示, 则黑体表面黑漆的比辐射率为

$$\varepsilon_{bp} = 1 - r_p - (1 - \varepsilon_{bp}^0 \lambda_b)(1 - r_p)^2; \quad (25)$$

内部黑体的黑度系数为

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

根据上述玷污模型以及 HIRS 仪器各参数的测值^[23], 对 HIRS-2 仪器长波红外通道中的第 1 通道 ($\nu = 668.5 \text{ cm}^{-1}$, $\Delta\nu = 3 \text{ cm}^{-1}$) 和第 4 通道 ($\nu = 703 \text{ cm}^{-1}$, $\Delta\nu = 16 \text{ cm}^{-1}$) 进行了模拟计算, 两者结果非常相似. 由于短波红外和可见光通道的光路与去掉红外分色片情况下的长波红外通道完全类似, 它们的测值恢复不会比长波红外通道差. 因此, 这里只给出第 4 通道的模拟计算结果, 便于与无活动门的结果^[23]相比较.

在图 1 中给出在不同玷污条件下, 当探测器分别看黑体、4 K 冷空间以及活动门时的输出电压 v_{33} 、 v_{31} 和 v^* . 由图 1 可以看出, 黑体受损伤或老化 (λ 值减小) 引起的仪器性能退化远小于玷污引起的退化.

在无测量误差的条件下, w_{33} 和 w_{32} 完全可以准确恢复. 但是实际上任何测值都是有误差的. 在这里, 测量误差应包括扫描镜、主镜和次镜的反射率的相对误差 δr_{op} 及其温度实时测量误差 ΔT_{op} 、估算其它所有光学元件对输出电压贡献的相对误差 $\Sigma \delta \gamma = \delta \gamma_{sp} + \delta \gamma_{f1} + \dots$

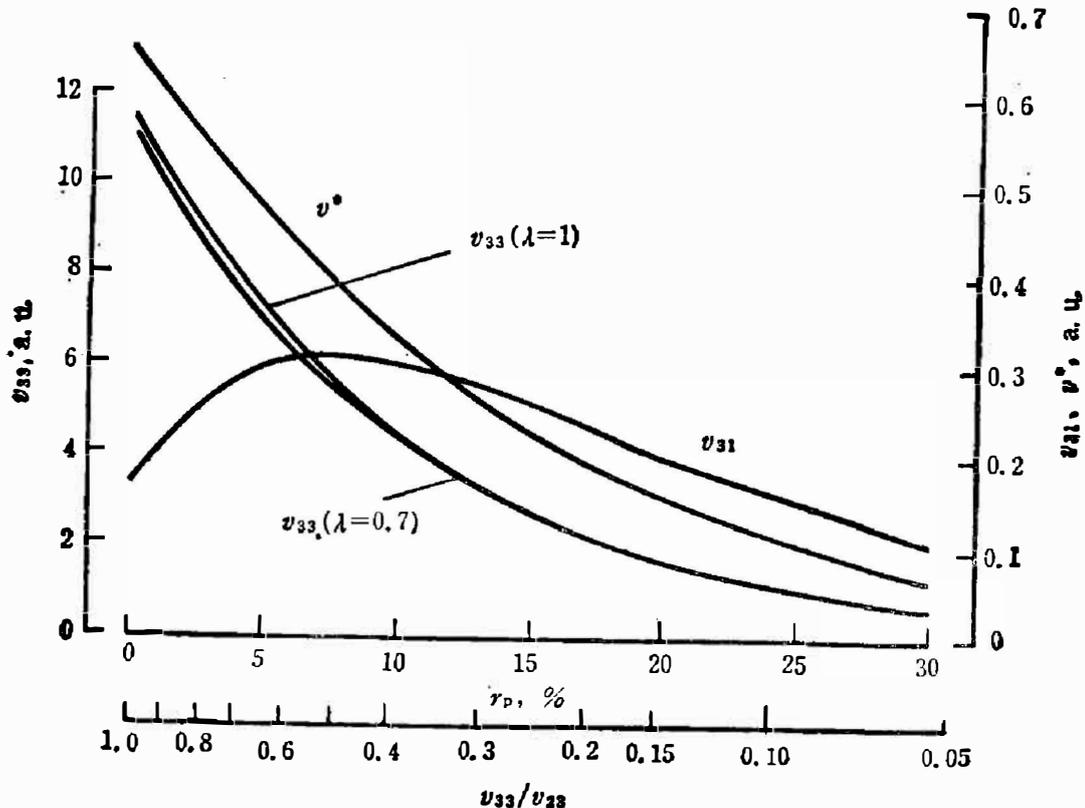


图 1 HIRS-2 输出电压随玷污程度的变化

Fig. 1 Variation of the output voltage of HIRS-2 with contamination.

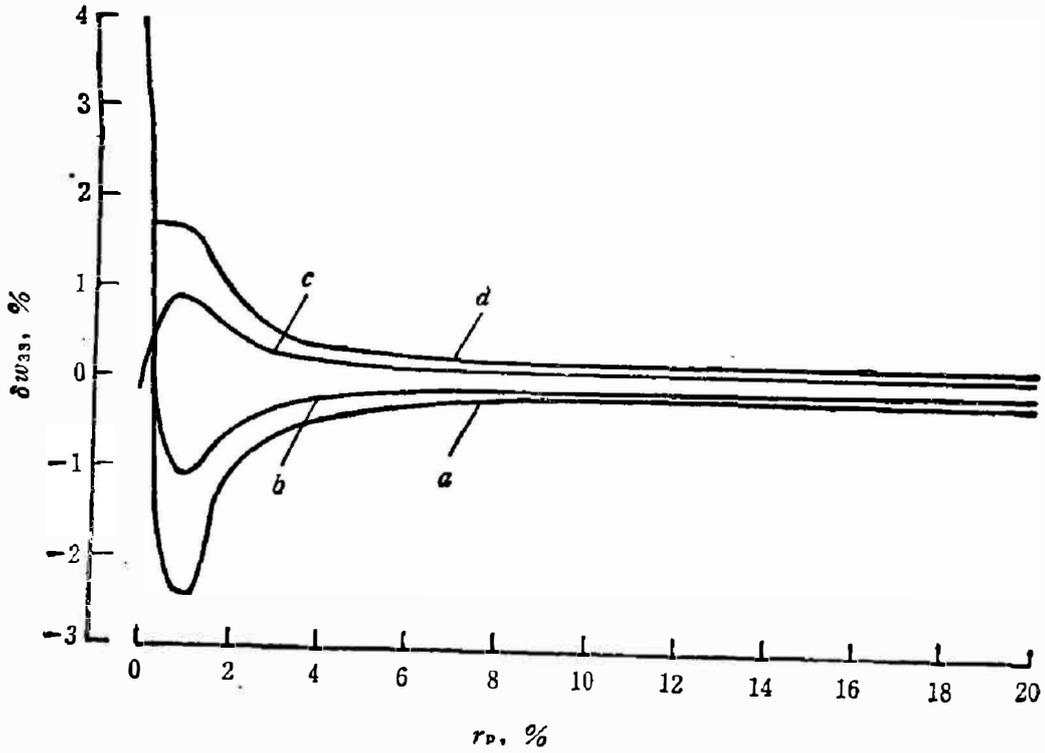


图 2 扫描镜、主镜和次镜的反射率测量误差 δr_{op}^0 引起的恢复误差 δw_{33}
 a、b、c 和 d 分别表示 $\delta r_{op}^0 = +0.2\%$ 、 $+0.1\%$ 、 -0.1% 和 -0.2%

Fig. 2 Restoration error δw_{33} caused by the scanning, primary and secondary mirrors.

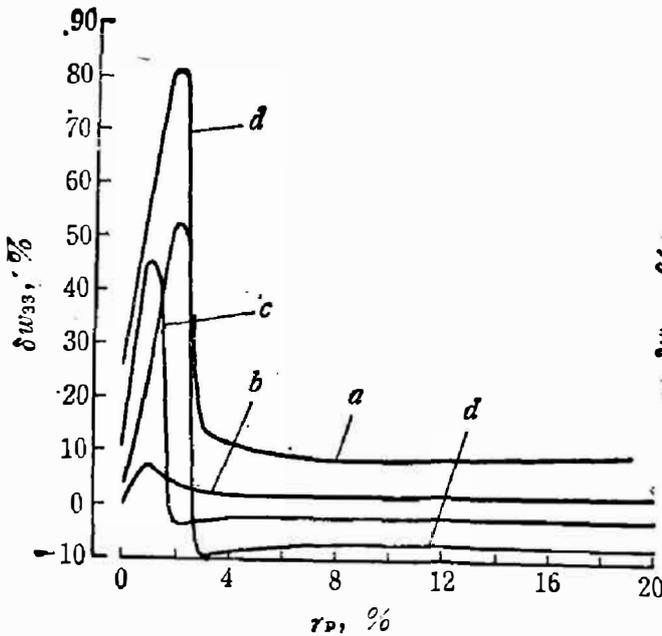


图 3 扫描镜、主镜和次镜的温度实时测量误差 ΔT_{op} 引起的恢复误差 δw_{33}

a、b、c 和 d 分别表示 $\Delta T_{op} = +2K$ 、 $+0.5K$ 、 $-0.5K$ 和 $-2K$
 Fig. 3 Restoration error δw_{33} caused by the realtime temperature measurement errors ΔT_{op} of the scanning, primary and secondary mirrors.

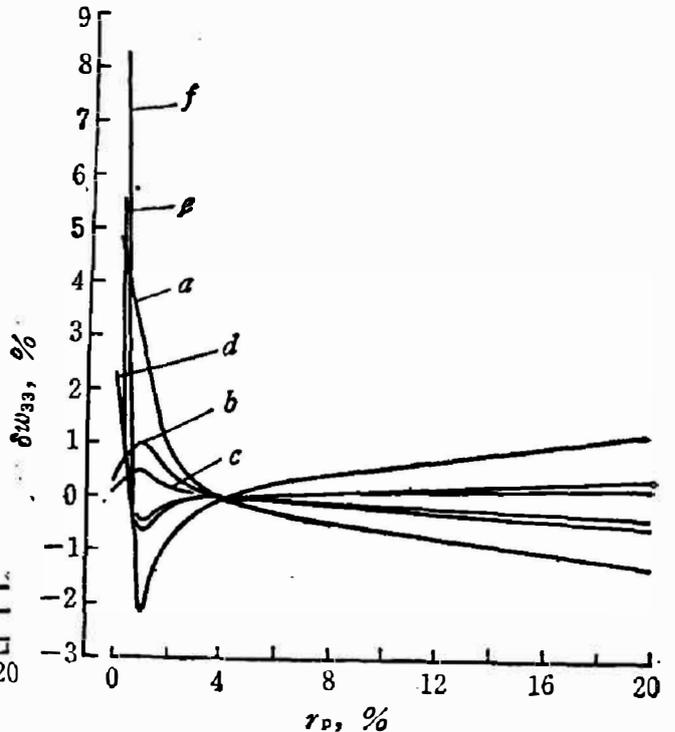


图 4 其它光学元件参数的测量误差和估计误差 $\Sigma \delta \gamma$ 引起的恢复误差 δw_{33}

a、b、c 和 d 分别表示 $\Sigma \delta \gamma = +2\%$ 、 $+1\%$ 、 -1% 和 -2%
 Fig. 4 Restoration error δw_{33} caused by the parameter measurement errors and the estimation errors $\Sigma \delta \gamma$ for other optical parts.

$+\delta\gamma_d$, 以及输出电压的 13 位量化误差. 在单独存在这些测量误差的情况下, 测值恢复误差与玷污的关系分别如图 2~5 所示. 对于第 1 通道, 由于其输出电压比其它通道小得多, 在测值恢复计算中的电压值是乘十以后量化再除以十的数值.

在上述四种测量误差中, δr_{op} 和 $\Sigma\delta\gamma$ 引起的测值恢复误差, 可以通过适当提高测值和估计的精度得以减小. 量化误差引起的 w_{32} 和 w_{33} 测值恢复误差是随机的, 可以通过适当的数据处理得以减少. 但是 ΔT_{op} 引起的 w_{32} 和 w_{33} 测值恢复误差是严重的, 而且目前可能尚难以抑制.

如果暂不考虑 ΔT_{op} 的影响, 取 $\delta r_{op} = \pm 0.1\%$, $\Sigma\delta\gamma = \pm 2\%$, 并且对输出电压如同 HIRS-2 仪器那样进行 13 位量化处理, 其结果在 $0.04 \leq r_p \leq 0.19$ 的玷污范围内, 或在输出电压下降百分率 $0.7 \geq v_{33}/v_{23} \geq 0.16$ 的范围内, 综合的恢复误差为 $|\delta w_{33}| \leq 1.1\%$, 如图 6 所示. 如果对输出电压加以适当的数据处理, 使其量化误差降低到相当于 15 位量化误差的水平, 则在同样的 v_{33}/v_{23} 变化范围内综合的恢复误差将下降到 0.5% 以下.

值得注意的是, 在玷污初期, 即当 $0 \leq r_p < 0.03$, 或 $1 \geq v_{33}/v_{23} > 0.75$ 时, 恢复误差极大, 本方法完全不能使用.

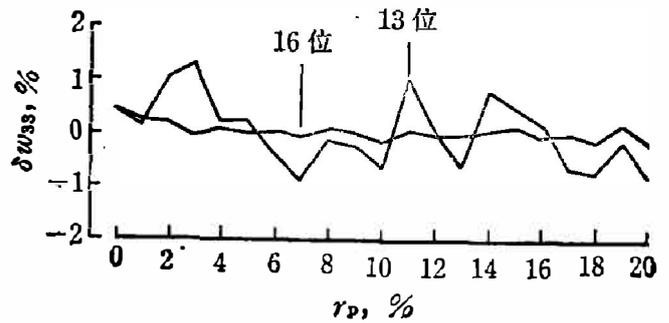


图 5 输出电压 13 位和 16 位量化误差引起的恢复误差 δw_{33}

Fig. 5 Restoration error δw_{33} caused by the 13 bits and 16 bits quantization errors of output voltages.

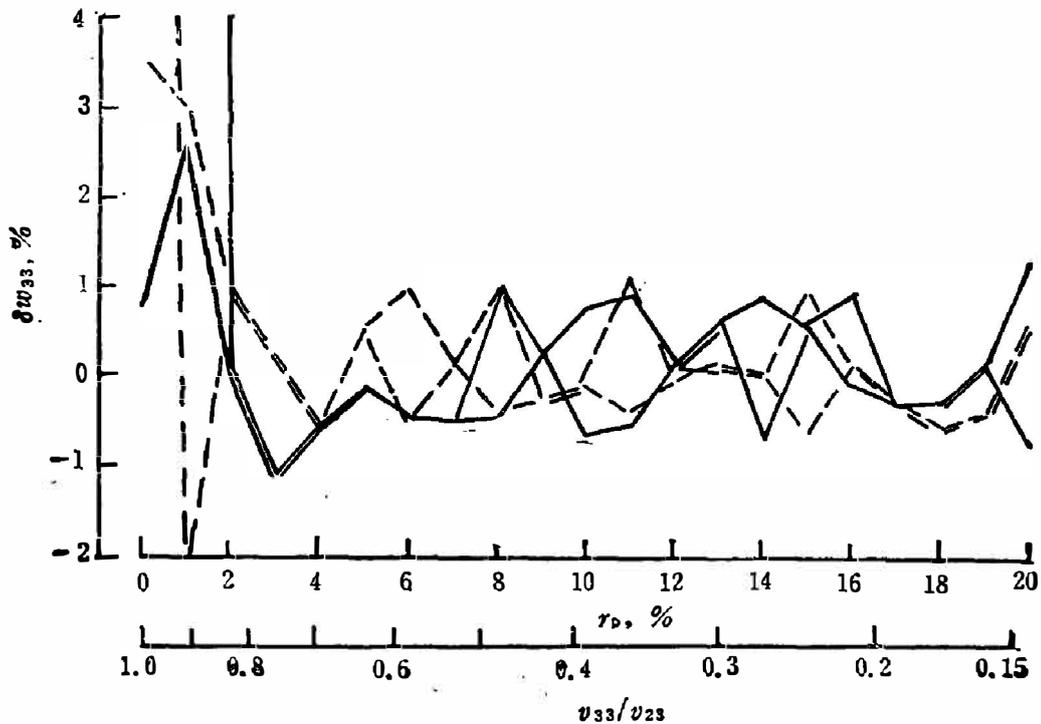


图 6 当 HIRS-2 仪器 290K 黑体的性能严重退化时, 由除了扫描镜、主镜和次镜的温度实时测量误差以外的所有测量误差引起的第 4 通道的恢复误差

Fig. 6 Restoration error of channel 4 of HIRS-2 caused by all measurement errors except the real-time temperature measurement error ΔT_{op} , when the performance of the 290 K blackbody degraded seriously.

4. 结 论

(1) 与前一种方法^[1,2]一样,对于探测器响应率 \mathcal{R} 和电路增益 θ 变化引起测量数据准确率的下降,使用活动门方法可以使 w_{32} 和 w_{33} 测值恢复为准确数据。

(2) 扫描镜、主镜和次镜的测温误差 ΔT_{op} 对 w_{32} 和 w_{33} 测值恢复误差 δw_{33} 的影响远大于其它测量误差对 δw_{33} 的影响,能否找到减小此误差的途径是本方法是否有效的决定性因素。

(3) 在不计 ΔT_{op} 的影响,扫描镜、主镜和次镜的反射率测量误差为 $\delta r_{op} = \pm 0.1\%$ 和 $\gamma_p, \gamma_n, \dots, \gamma_d$ 的估计误差为 $\Sigma \delta \gamma = \pm 2\%$ 的条件下,如果对输出电压 v_{33} 采用 13 位量化,则 $0.04 \leq r_p \leq 0.19$ 亦即当输出电压 v_{33} 下降到原有值的 7~16% 范围内时,则 $|\delta w_{33}| \leq 1.1\%$; 如果对 v_{33} 进行数据处理,达到 15 位的量化误差水平,则 $|\delta w_{33}| \leq 0.5\%$ 。

(4) 在仪器性能退化初期,本方法不适用。

致谢——匡定波研究员对本方法曾提出宝贵意见,作者谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z. X., *Applied Optics*, **24** (1985), 3497.
- [2] 张肇先, *红外研究*, **9** (1990), 5:365.
- [3] 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 A SATELLITE-BORNE INFRARED SPECTROMETER IN SPACE III MOVABLE DOOR METHOD

ZHANG ZHAOXIAN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, 200083, China)

ABSTRACT

The possibility is discussed of restoring the radiant power measurements w_{32} and w_{33} , of the internal blackbodies in the instrument HIRS-2 carried on the TIROS-N and NOAA Satellites to its original accuracy if a black-painted door which could be opened or closed according to instruction is set up in the instrument that is in a condition of serious degradation.