

太阳红外亮度温度的球载探测系统

郭祺伟 邹惠成

(中国科学院上海天文台)

摘要——本文主要讨论从 35 km 高空气球上对太阳 18 μm 辐射进行探测的红外探测系统, 对探测系统精确度的定标, 对球载观测数值的估计, 以及观测的数据处理和结果。最后得到太阳 18 μm 的亮度温度值为 $4685 \pm 136 \text{ K}$, 与目前国际采用值相接近。

一、引 言

日核产生的能量以辐射的形式经过太阳的对流层和色球层等向外发射。由于对流层原子的数目从里向外不断增加, 使得不透明度相应增加。因此在对流层, 温度达到了比日核低得多的数值。在光球层和色球层之间, 可见光和红外辐射的大部份发射和吸收来自负氢离子 (H^{-1}), 负氢离子的密度影响到光谱亮度温度的数值。太阳的活动是以十一年为周期的变化, 并与太阳黑子出现的多少有直接的关系。因此, 可以根据不同波长的亮度温度数据来研究太阳大气的不透明度和负氢离子密度的变化, 也可以用这些数据来改进太阳常数。

我们于 1982 年 9 月 24 日用高空气球作为运载手段(气球的体积为 30000 m^3 , 飞行高度为 35 km, 仪器吊舱重量是 189 kg), 在一小时之内取得太阳波长为 18 μm 的三组辐射强度数据。观测仪器安全返回地面。这是我国第一次成功的高空天文观测。

二、红外探测系统

我们采用口径为 135 mm、焦距为 375 mm 的牛顿式望远镜, 光路经两次反射后使焦点落在镜筒外, 以便于安装调制盘、滤光片和探测器。焦平面上每毫米相当于 $9'$ (角分)。详见图 1。太阳光经过红外窗口(1), 几乎使全部可见光吸收或反射, 仅让红外辐射通过。调制盘的步进马达驱动器(6)由晶振、分频和功放组成。调制频率为 20 Hz。前放增益为 100 倍。接收机输出的直流电压值为二路输出, 一路经 POM 系统和 AD 转换后, 从球上发送到地面, 并由终端设备解调显示; 另一路经 AD 转换后, 由球上磁带记录仪(11)记录。

红外窗口和滤光片 为了保护滤光片和探测器, 加装了红外窗口。对红外窗口材料的要求是: 1) 在所观测的红外波段透过率要高; 2) 当环境温度在 $\pm 80^\circ\text{C}$ 变化时不变形, 更不能断裂; 3) 直径要大于 150 mm。根据上述要求对光学玻璃、半导体材料和塑料薄膜等

本文 1983 年 7 月 15 日收到。修改稿 1983 年 10 月 8 日收到。

多种材料进行分析、测量和试验,最后确定采用“聚对苯二甲酸乙二醇酯”材料,其透过率曲线如图2所示,这种材料能在 $+160^{\circ}\text{C}$ 至 -110°C 的环境温度下工作,性能稳定。

红外滤光片¹⁾采用二个波段,第一个波段的峰值波长是 $4.6\mu\text{m}$,带通从 $4.4\mu\text{m}$ 到 $5.2\mu\text{m}$,参看图3中的曲线1;第二个波段的峰值波长是 $18\mu\text{m}$,带通从 $14\mu\text{m}$ 到 $22\mu\text{m}$,参看图3中的曲线2。

红外探测器 由于环境温度变化大,气球起飞和返回着陆时有震动和冲击,同时根据太阳辐射强等特点,我们选用了中科院上海技术物理所研制的GLT型钽酸锂(LiTaO_3)热释电探测器。为了增大观测视场和增加观测波段,由上海技物所研制了特殊结构的探测器,采用 ZnSe 窗口,在同一个真空组件内装了三个圆形并联的 LiTaO_3 元件,每个元件的直径是 1mm ,三个元件组成等边三角形,每边长为 4.8mm ,这样可以增加观测视场约一倍。由于太阳象的直径是 3.5mm ,因此在观测的某一时刻,太阳只能照射到一个 LiTaO_3 元件上。在三个元件的两个前面分别装了上述两个波段的滤光片,另一个元件前面不装滤光片,以便能在环模试验和地面观测时作测试红外通道用。在环模试验中,探测器与望远镜装在一起。当真空度下降到 10 Torr ,环境温中, 18 km 度在一小时内由 -50°C 至 $+50^{\circ}\text{C}$ 变化时,探测器没有变劣的现象。实际上,在观测过程高度的环境温度是最低值,为 -35°C (随季节和年份稍有变化),探测器的工作温度是 -20°C ;在 35 km 的高度,环境温度为 0°C ,探测器的工作温度为 $+8^{\circ}\text{C}$ 。观测的结果和我们估计的数值相差不大,说明这种探测器能符合太阳红外观测的要求。

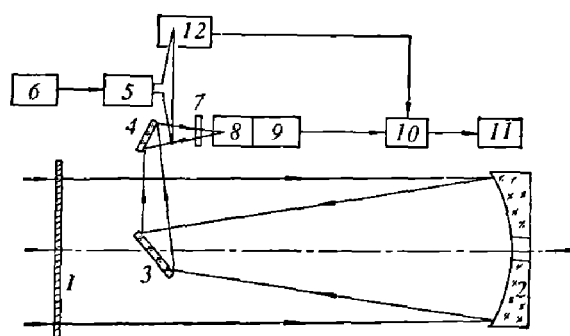


图1 红外探测系统

1—红外窗口; 2—望远镜主镜; 3—副镜; 4—反射镜; 5—调制盘及步进马达; 6—步进马达驱动器; 7—滤光片; 8—探测器; 9—前置放大器; 10—接收机; 11—磁带记录仪; 12—调制频率输出器

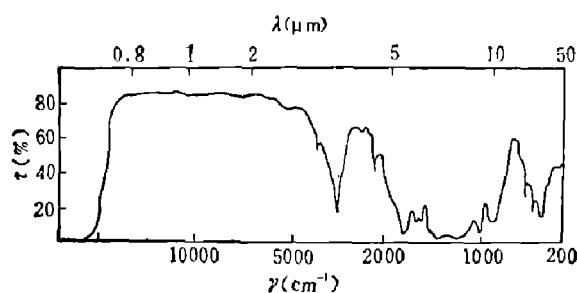


图2 红外窗口透过率特性

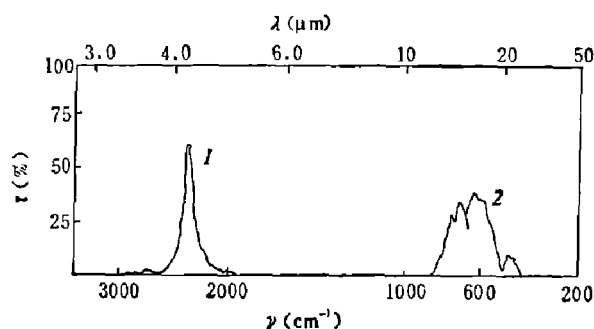


图3 观测的红外波段

信号接收机 太阳的红外信号经过前置放大后,送到接收机,进行交流放大,再经过滤波器鉴相和同步检波得到直流输出。接收机的增益分为二档,在高空观测时,增益采用四倍;在地面观测试验及定标时采用四百倍。整机的线性误差小于 4% ,电路的积分时间常数约为 1 s ,其最大的电压输出为 8 V ,经环模试验表明,环境温度降到 -20°C 时,接收机正常工作,滤波特性没有明显的变化,滤波器带宽为 $\pm 1.0\text{ Hz}$,中心频率为 20 Hz ,通带内的波动小于 2 dB 。

1) 滤光片由中国科学院上海技术物理研究所提供。

三、实验室定标

定标的目的是求得探测系统的响应率。由于我们仅有 500 K 的黑体, 在我们观测的波段内信号太弱, 因此, 只能将探测器、前置放大器和接收机连在一起定标。

这一系统的响应率

$$R_s = \frac{V_s}{P}, \quad (\text{V/W}) \quad (1)$$

$$P = \frac{x\epsilon\sigma(T_1^4 - T_0^4)A_1A_0}{\pi r^2}, \quad (2)$$

其中: x 为均方根转换系数(因实验室定标和球载观测时都采用相同的装置, 因此系数 x 相互抵消, 在这里不必求出); ϵ 为黑体的发射率(我们采用 500 K 黑体, 经大邑计量院定标, 精确度为 99.99%); T_1 为黑体温度, 500 K; T_0 为环境温度, 301 K; A_1 为光阑出孔面积, 12.56 mm²; A_0 为探测器面积, 0.785 mm²; r 为光阑出孔到探测器元件的距离, 15 cm; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。

根据上述数据求得 $P = 97.77 \times 10^{-8} \text{ W}$, 从记录仪中读得电压的平均值为 $2.8622 \times 10^{-2} \text{ V}$ 。因此, 求得这一系统的响应率 $R_s = 29275 \text{ V/W}$ 。

望远镜的有效口径、望远镜镜子镀铝的反射率、红外窗口和滤光片的透过率(由红外分光光度计测试)的数据, 在下面的计算中考虑进去。

四、球载观测数值的估计

在讨论如何计算可能达到的球载观测电压值之前, 首先考虑上述探测系统加进了望远镜、红外窗口和红外滤光片后接收到的太阳能 P_s ,

$$P_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_\lambda \eta_\lambda d\lambda \cdot A_s \cdot S_T \cdot \eta_A \cdot G^3}{\pi D^2}, \quad (3)$$

这里 $\lambda_2 \sim \lambda_1$ 为观测的红外波段, 从 $22 \mu\text{m}$ 至 $14 \mu\text{m}$; η_λ 为红外窗口和红外滤光片组成的红外波段内单位波长透过率(%); A_s 为太阳的视面积, $1.522 \times 10^{23} \text{ cm}^2$; S_T 为望远镜的有效口径, 117.62 cm^2 ; η_A 为气球飞行的实际高度的大气透过率, 98.9%; G 为望远镜玻璃的反射率, 95%; D 为太阳到地球的平均距离, $1.501 \times 10^{13} \text{ cm}$; ω_λ 为太阳光谱辐射通量密度 ($\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$), 根据普朗克定理

$$\omega_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (4)$$

这里 c_1 为 $3.7415 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$; c_2 为 $1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ 为带通的峰值波长, $18 \mu\text{m}$; T 为我们根据国际采用的太阳在红外波段 $14 \mu\text{m}$ 到 $22 \mu\text{m}$ 的亮度温度平均值, 约 4700 K。

式(3)的积分项是把每一波长的能量乘以这一波长的透过率, 最后求和, 得 0.17734 W , 把上述数据代入式(3)可求得 $P_s = 3.8033 \times 10^{-4} \text{ W}$ 。

预计观测到的电压值

$$V_T = P_s \cdot R_s \cdot \frac{A_0}{A_I}, \quad (5)$$

这里 A_0 为探测器元件的面积, 0.785 mm^2 ; A_I 为太阳望远镜后的成像面积, 9.566 mm^2 。

根据上述数据代入式(5)求得电压值为 0.91 V , 实际观测到的电压平均值为 0.87 V , 最大值为 1 V 。

五、观测的数据处理和结果

我们把式(3)写成如下形式:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_\lambda \eta_\lambda d\lambda = \frac{\pi \cdot P_s \cdot D^2}{A_s \cdot S_T \cdot \eta_A \cdot G^3} \circ \quad (6)$$

式(6)右面各项均为已知数, 其乘积设为 c , 并将式(4)代入式(6)得:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{\eta_\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda = c \circ \quad (7)$$

从图3中的曲线2看出, 观测带通的峰值是 $18 \mu\text{m}$, 由式(7)可求得峰值波长 $18 \mu\text{m}$ 相应的亮度温度值, 每一个电压值对应于一个亮度温度值, 我们观测到三组完整的数据, 每组取九个信号电压值, 算得太阳在 $18 \mu\text{m}$ 的亮度温度为 $4685 \pm 136 \text{ K}$, 与有效波长为 $20 \mu\text{m}$ 的国际采用值(1977)的亮度温度值($4648 \pm 186 \text{ K}$)相接近。

我们也考虑到红外背景辐射的影响。红外背景的辐射包括三个方面: 1) 宇宙背景, 2) 天空背景, 3) 望远镜的辐射背景。前两种背景与太阳的辐射相比可以忽略不计。望远镜的辐射背景在我们这个系统中主要来源于红外窗口, 它吸收了部份的太阳能量, 使其自身温度上升, 形成二次红外辐射源, 若其温度上升到 80°C 时, 其再辐射强度也只有太阳的 $1/1000$ 左右, 因此也可以忽略不计。

致谢——此项工作的测量和计算由唐才超同志进行, 红外接收机由吴钟奇同志研制, 并得到中科院上海技术物理所的大力支持, 在此表示感谢。

BALLOON-BORNE DETECTION SYSTEM FOR SOLAR INFRARED BRIGHTNESS TEMPERATURE

GUO QIWEI, ZOU HUICHENG

(Shanghai Astronomical Observatory, Academia Sinica)

ABSTRACT

Discussed in this paper are the balloon-borne infrared detection system which is used for detecting solar radiation at the wavelength of $18 \mu\text{m}$ from the altitude of thirty five kilometers, accuracy calibration of the system, and data processing of observed results. The solar brightness temperature value at $18 \mu\text{m}$, that is $4685 \text{ K} \pm 136 \text{ K}$, is obtained. This result approaches to the present value adopted internationally.