

光伏铋化铟探测器低噪声前置放大器及其背景热辐射补偿

钱 忠 钰

(中国科学院北京天文台)

1. 引言

光伏铋化铟器件是一种性能优良的红外探测器,它的工作波长为 $1\sim 5.5\mu\text{m}$,正好包含了J、H、K、L和M五个重要的大气窗口,量子效率较高($\eta\geq 50\%$),噪声等效功率低达 $1\times 10^{-15}\text{W}\cdot\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$ 左右*,是目前天文观察最常用的红外探测器。

光伏铋化铟探测器具有很高的等效输出阻抗,在工作温度($50\sim 77\text{K}$)下通常为 $10^8\sim 10^{12}\Omega$ 。高输出阻抗将降低噪声电流,并使NEP降低,但高输出阻抗探测器也对前置放大器提出了特殊要求,除了通常的低噪声要求之外,还要求前放有极高的输入阻抗。目前常采用阻抗变换放大器,它把探测器输出的微弱的光电流转变成电压信号输出,并且不引入明显的附加噪声。这种放大器的第一级常由高输入阻抗和低噪声的结型场效应管(JFET)对组成,和反馈电阻一起安装在杜瓦瓶内紧靠探测器的位置,以降低噪声。

由于JFET的输入阻抗很高,这种放大器的输入阻抗基本上由反馈电阻 R_F 决定。显然, R_F 选得较大对降低噪声电流是有利的,但 R_F 值不能太大,否则它和分布电容一起形成的时间常数也将太大,从而限制了放大器的带宽。通常 R_F 取值与探测器等效输出阻抗 R_D 相近似。

这种放大器的输出电压可表示为 $V_0=I_d\cdot R_F$,其中 I_d 为探测器的光电流。由于背景辐射随着波长的增长而迅速地增大, I_d 可以有很大的变化,因此,如果背景温度为 300K ,为了在J波段降低噪声电流而挑选较大的 R_F 值,那么,在L和M波段放大器将会产生严重饱和。只有设法补偿背景辐射光电流,才能保证放大器正常工作。

2. 背景辐射补偿方法和补偿电阻的选择

目前常用的补偿方法如图1所示。在需要补偿的波段,将补偿电阻 R_0 并联到 R_F 上,挑选 $R_0\parallel R_F$ 的有效值 R_{eff} ,使放大器工作在线性区。为尽可能减小分布电容,补偿开关安置在杜瓦瓶内靠近探测器的位置上。我们使用 $\phi 2\times 10\text{mm}$ 的微型磁性干簧继电器作为补偿控制开关,由固定在滤光片轮上的小磁铁控制。当需要进行背景热辐射补偿的滤光片进入光路时,继电器在磁铁的作用下自动闭合(参见图2)。这种补偿方法安全可靠,效果很好。也可采用其它类型的可安装在探测器附近的继电器。

在波长较短的区域,系统工作在探测器热噪声限,这时增大 R_F 能有效地降低系统的

* 美国 Santa Barbara Research Center 生产的天文用低背景光伏铋化铟探测器

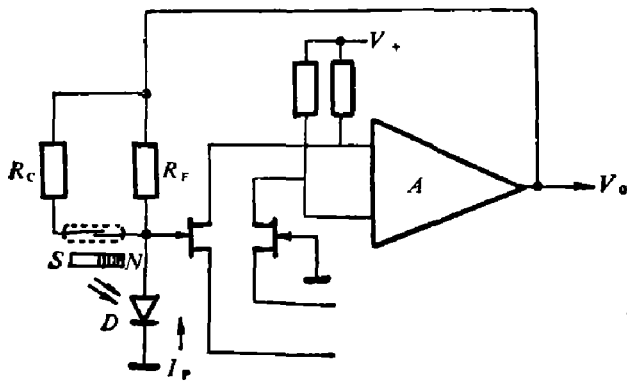


图1 用磁性干簧继电器控制补偿电阻原理图

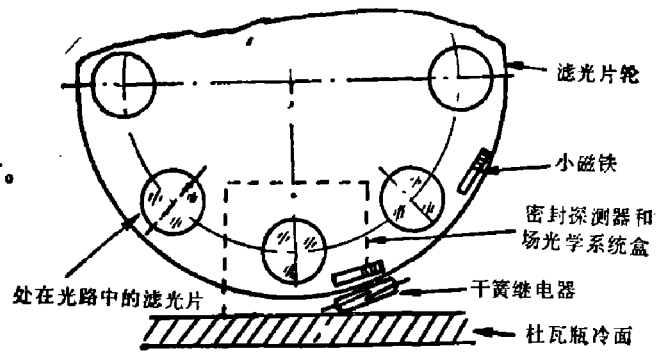


图2 用磁性干簧继电器控制补偿电阻装置示意图

NEP, 并且, 在这一波段背景辐射流量小, 允许使用较高的 R_f 值。随着波长增加, 系统工作在背景限, 这时探测器热噪声在系统总噪声中居次要地位, 适当地减少 R_f 值对系统的 NEP 不会有明显影响, 而且正需要用补偿电阻 R_c 来避免前置放大器的饱和。

我们由此得出反馈电阻 R_f 和补偿电阻 R_c 的选择原则: R_f 可尽量选高一些, 以放大频率特性允许为原则, 通常选 R_f 值为 $(2 \sim 5) \times 10^{10} \Omega$, 即等于或略低于探测器的等效阻抗。选择 R_c 时, 则首先要求前置放大器在 M 波段工作时不饱和, 这样就给 R_c 确定了上限。同时还要求探测系统工作在 L 波段时, R (即 $R_c \parallel R_f \parallel R_D$, 由于 $R_c \ll R_f$ 、 $R_c \ll R_D$, 所以 $R \approx R_c$) 的热噪声电压仍然远小于该波长处的背景涨落噪声, 这就给 R_c 规定了下限。在这一上、下限范围内选择 R_c 是合理的, 参看图 3。这里, $R_{c, \max} \leq V_+ / I_{PM}$ (V_+ 为正电源电压、 I_{PM} 为 M 波段的背景热辐射电流), $R_{c, \min}$ 为电阻热噪声理论曲线和实测 L 波段输入等效噪声电流曲线的交点。

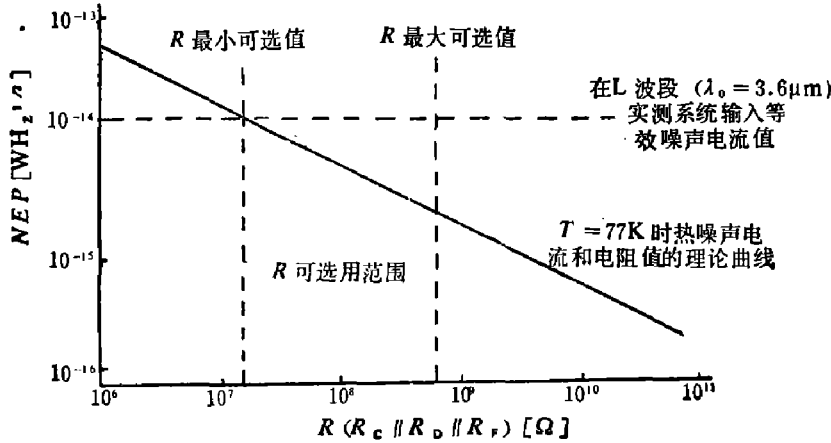


图3 补偿电阻 R_c 的选择范围

3. 相位自动补偿和前置放大器电路

红外探测系统常采用调制方法抑制噪声, 在信号检出过程中则常使用锁相放大器。在并联 R_c 进行背景辐射补偿之后, 放大器的相位特性也被改变, 这时就必须重新调整锁相放大器的移相器, 以便获得最大的信号输出, 这对经常变换滤光片的红外天文观测是很不方便的, 为解决这个问题, 可以在补偿电阻 R_c 上再并联一个相位校正网路, 相位校正网路是一个小电容, 和 R_c 并联, 其值与 R_f 值及电路分布参数有关, 难以精确计算, 通常由实验确定。加上相位电容后, 就可使前置放大器接入补偿电阻对相位特性保持不变, 即实现相位自动补

偿,这给使用带来了很大的方便,并大大提高了效率。

考虑背景辐射补偿和相位补偿之后的碲化镉光伏探测器前置放大器的完整的电路图见图4,图中 $C_0 \sim 10 \text{ PF}$ 、 $R_0 = 6.8 \times 10^8 \Omega$ 、 $R_F = 2.6 \times 10^{10} \Omega$ 、 A_1 、 A_2 、 A_3 均为SG3250低功耗运算放大器。在波长小于 $2.2 \mu\text{m}$ 的J、H、K波段,工作在探测器热噪声限。放大器第一级为低噪声,高阻抗JFET对管和运算放大器组成的阻抗转换级,为了降低噪声,减小分布电容和避免引线所产生的微音效应噪声,场效应管和反馈电阻、补偿电阻及控制开关都安装在杜瓦瓶内紧靠探测器的位置;第二段为电压放大级,放大倍数为1、10和100,分档可调;第三段为低通滤波器,用来压缩噪声带宽,以免高频噪声可能造成的锁相放大器瞬时饱和。

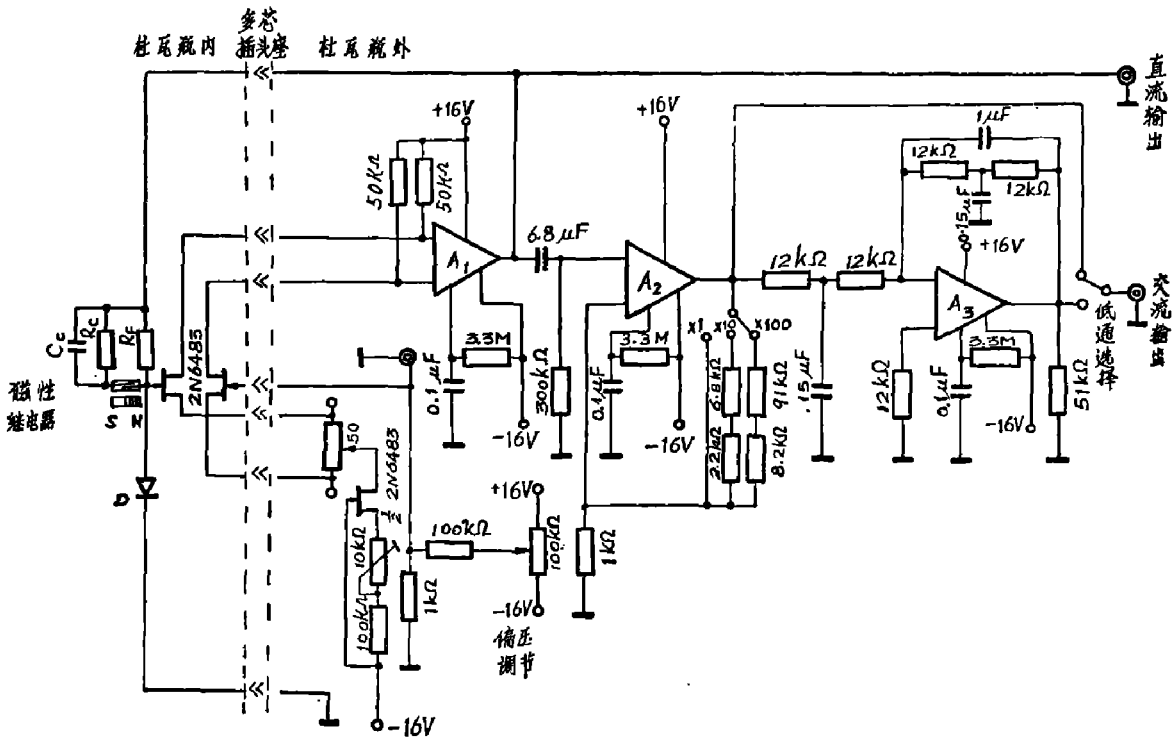


图4 碲化镉红外探测器前置放大器电路图

前置放大器的基本特性如下:

- 输入阻抗: 主要取决于反馈电阻 R_F ;
- 等效输入噪声电压: $\sim 15 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ (测量条件: $R_F = 510 \Omega$ $f = 11 \text{ Hz}$);
- 放大倍数: $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$, 分档可调;
- 带宽: $0.2 \sim 60 \text{ Hz}$;
- 功耗: $\sim 32 \text{ mW}$ ($\pm 16 \text{ V} \times 1 \text{ mA}$, 用四个积层电池供电)。

参 考 文 献

- [1] 钱忠钰, 红外研究, 2 (1983), 4: 285~288.
- [2] Keyes R. J., *Optical and Infrared Detectors*, Springer-Verlag, 1977.
- [3] Gillett, F. C. et al., *Opt. Eng.*, 16 (1977), 6: 544~550.

(本文1985年1月21日收到。修改稿1985年3月12日收到)