

·光电探测·

光电探测放大器的噪声分析

张正茂, 陈 峰

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘 要:对光电探测放大器的复杂噪声特性进行了分析,研究了光电探测放大器的反馈电阻噪声、输入端电压噪声及电流噪声的特性。通过对放大电路波特图及电压噪声频谱特性的分析,得出输出电压噪声的计算方法。结合具体电路,通过计算电流、电阻及电压噪声,总结出减少光电探测电路噪声的设计原则。

关键词:光电二极管;运算放大器;噪声分析

中图分类号:TN722.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)03-0037-04

Noise Analysis of Opto-electronic Detection Amplifier

ZHANG Zheng-mao, CHEN Feng

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The complex noise features of the opto-electronic detection amplifier are analyzed. The characteristics of the feedback resistance noise, input voltage noise and current noise from the opto-electronic detection amplifier are studied. The calculation method of the output voltage noise is obtained by analyzing the bode diagram of the amplifier circuit and spectrum characteristic. Combining the specific circuit, the principle of the low noise opto-electronic detection circuit is summarized by calculating the current, resistance and voltage noise.

Key words: photodiode; operational amplifier; noise analysis

光电探测电路的作用是将输入电流转换为输出电压,最简单的方法是采用一个电阻连接到地,但这种方法受到信号带宽、负载阻抗、电流源输入阻抗等因素的制约,采用运算放大器可有效地消除这些因素的影响。典型电路如图1所示^[1,2]。

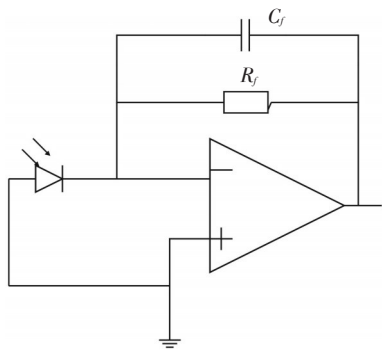


图1 光电探测电路原理图

在这个电路中光电二极管等效为电流源,它将光子转换为光电流,通过反馈电阻 R_f 将光电流转换为电压,当把运放看作理想运放时,光电二极管产生的全部信号都转换到输出端,电流源的阻抗被运放隔离,不用考虑电流源的阻抗对信号的影响。放大器的输出是低阻,可与多种负载连接。但实际电路中光电二极管结电容的存在、反馈电容及放大器带宽的影响,使光电探测电路的噪声特性较为复杂。

1 噪声电路模型

图1的光电探测电路的等效噪声模型可采用图2表示^[3,4]。

光电探测电路的输出噪声由3部分组成^[5]:电阻的热噪声 e_{nr} 、放大器的电流噪声 e_{noi} 、放大器的电压噪声 e_{noe} 。

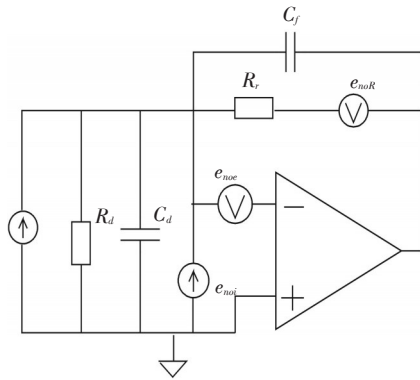


图2 光电探测电路等效噪声模型

由于3个噪声源为非相干噪声源,总的噪声表示为

$$e_{no} = \sqrt{e_{noR}^2 + e_{noi}^2 + e_{noe}^2} \quad (1)$$

$$E_{no} = \sqrt{E_{noR}^2 + E_{noi}^2 + E_{noe}^2} \quad (2)$$

式中, e_{no} 为噪声谱密度; E_{no} 为输出噪声电压。其中的各电压采用RMS均方根值表示。在采用电压比较器对放大信号进行后续处理的应用中,其精度受瞬时噪声的影响,对输出信号的峰值更为关注,在工程应用中通常需对噪声的峰值进行估算。放大器输出噪声的分布具有高斯分布特性,可采用概率预估噪声的峰值。波峰因数是噪声的峰值与噪声RMS值的比值,可采用式(3)表示

$$C = \frac{E_{peak}}{E_{rms}} \quad (3)$$

噪声的RMS值具有统计特性,采用示波器可精确测量电路输出噪声的RMS值,而峰值由于具有瞬时特性无法准确测量。波峰因数C可根据电路实际应用情况选取,通常波峰因数C取值为6.6。从表1可看出,当波峰因数C取值为6.6时,如噪声的RMS值为1V,则噪声的峰值超过6.6V的概率为0.1%。

2 噪声计算

表1 噪声RMS值与峰值的关系

峰值因数	噪声超过峰值的百分比/(%)
2	32
3	13
4	4.6
5	1.2
6	0.27
6.6	0.1
7	0.046
8	0.006

(1) 电阻噪声的计算

光电探测电路的电阻噪声的主要来源是反馈电阻的热噪声,电阻的噪声谱密度为^[6]

$$e_{noR}^2 = 4KTR \quad (4)$$

式中, K 为波尔兹曼常数,值为 1.38×10^{-23} J/K; T 为绝对温度(K); R 为电阻阻值。反馈电阻噪声表现为白噪声,其噪声值为谱密度函数与带宽的乘积,即

$$E_{noR}^2 = 4KTR\Delta f \quad (5)$$

式中, Δf 为等效噪声带宽,可看出电阻的热噪声与电阻值的平方根成正比,高的反馈电阻增加了系统噪声,同时高信号带宽会带来高噪声,反馈电阻的热噪声直接作用于光电探测电路的输出端,放大器对电阻噪声无增益。

光电转换电路的输出为 $E_o = i_p \times R_f$ 。 i_p 为光电电流; R_f 为反馈电阻,输出信号与反馈电阻成正比,而电阻产生的噪声与电阻的平方根成正比,可看出提高反馈电阻 R_f 的阻值可提高系统的信噪比。

(2) 电流噪声的计算

放大器或光电二极管的偏置电流会产生散粒噪声,散粒噪声谱密度为

$$i_{no}^2 = 2qI \quad (6)$$

而散粒噪声电流计算为

$$I_{no}^2 = 2qI\Delta f \quad (7)$$

由电流噪声产生的噪声输出为

$$E_{noi}^2 = 2qI\Delta f R_f^2 \quad (8)$$

噪声电流通过反馈电阻产生噪声电压,直接作用于输出端,放大器对其无增益,电流噪声与偏置电流的平方根成正比,与反馈电阻成正比。

(3) 电压噪声的计算

光电探测电路的信号增益可表示为反馈电阻与反馈电容的并联阻抗,如式(9)所示

$$A_s = \frac{E_o}{I_s} = R_f \parallel (1/j2\pi f C_f) = \frac{R_f}{1 + j2\pi f R_f C_f} \quad (9)$$

信号增益的转折频率点 $f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$ 。光电探测电路的电压噪声增益可表示为

$$A_n = \frac{E_{no}}{E_{ni}} \quad (10)$$

电路的反馈因子 β 为

$$\beta = \frac{Z_d}{Z_d + Z_f} \quad (11)$$

其中, $Z_d = R_d \parallel (1/j2\pi f C_d) = \frac{R_d}{1 + j2\pi f R_d C_d}$;

$$Z_f = R_f \parallel (1/j2\pi f C_f) = \frac{R_f}{1 + j2\pi f R_f C_f}$$

噪声增益为

$$A_n = \frac{1}{\beta} = \frac{R_f + R_d}{R_d} \cdot \frac{1 + j2\pi f (\frac{R_f R_d}{R_f + R_d})(C_f + C_d)}{1 + j2\pi f R_f C_f} \quad (12)$$

令式中,

$$f_z = \frac{1}{2\pi(R_f \parallel R_d)(C_f + C_d)} = \frac{1}{2\pi(\frac{R_f R_d}{R_f + R_d})(C_f + C_d)} \approx \frac{1}{2\pi R_f C_d};$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_f C_f}, \text{ 可得}$$

$$A_n = \frac{1}{\beta} = \frac{R_f + R_d}{R_d} \cdot \frac{1 + j\frac{f}{f_z}}{1 + j\frac{f}{f_p}} \quad (13)$$

光电探测电路的波特图曲线如图3所示, f_z 为零点频率; f_p 为信号带宽; 当 $f < f_z$ 时, $A_n = 1 + \frac{R_f}{R_d}$, 通常 $R_d \gg R_f$ 。在高频时 $f > f_p$ 时, $A_n = 1 + \frac{C_d}{C_f}$ 。 f_x 为放大器电压噪声增益曲线与放大器开环增益曲线的交点, $f_x = GBW / (1 + \frac{C_d}{C_f})$, f_x 为电路闭环增益带宽。由图3可看出, 当 $f > f_p$ 时, 信号增益 A_s 以 20 dB/十倍频程的速度衰减, 但噪声增益并没有衰减, 随着频率的增加, 系统的信噪比降低, 所以在电路设计中应降低 f_x 频率, 通过适当放大器电路参数的选择, 使 $f_x = f_p$, 以减小位于 f_x 与 f_p 频率间的噪声。

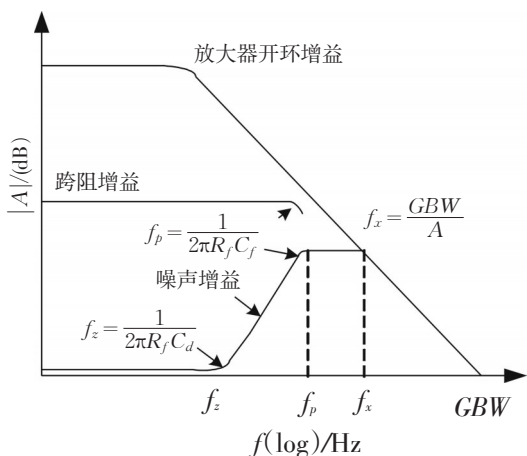


图3 光电探测电路波特图

放大器输入端的电压噪声由白噪声与 $1/f$ 噪声混合而成, 当 f 大于 $f_{1/f}$ 时主要是白噪声, 当 $f < f_{1/f}$ 时是 $1/f$ 噪声。典型的放大器的输入端电压噪声谱密度如图4所示。

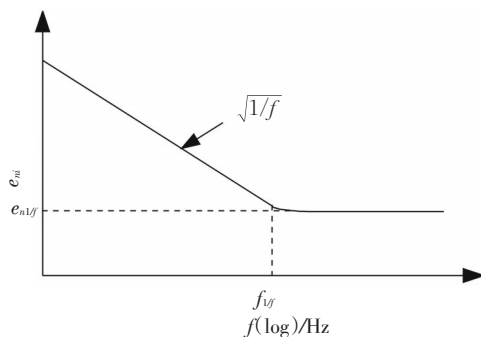


图4 放大器输入端电压噪声

由放大器输入端电压噪声产生的放大器输出端的噪声谱密度为输入端噪声与噪声增益的乘积, 可表示为

$$e_{noe}(f) = A_n(f) e_{ni}(f) \quad (14)$$

即为图4中噪声电压谱密度曲线与图3中噪声增益曲线的乘积, 当采用对数坐标时, 可通过对应频率数值相加的方式计算输出曲线^[5], 其结果如图5所示。

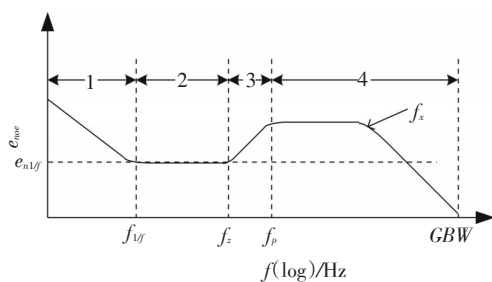


图5 电压噪声示意图

放大器输出端的 E_{noe} 为噪声谱密度函数在 0.01 Hz 至放大器单位增益带宽内的积分, 可表示为

$$E_{noe}^2 = \int_{0.01}^{GBW} |e_{noe}(f)|^2 df = \int_{0.01}^{GBW} |A_n(f) e_{ni}(f)|^2 df \quad (15)$$

由图5可将 0.01 至 GBW 频率内的积分分解为4个区域计算, 则 E_{noe} 可表示为

$$E_{noe} = \sqrt{E_{noe1}^2 + E_{noe2}^2 + E_{noe3}^2 + E_{noe4}^2} \quad (16)$$

可分别计算表达式, 即

$$E_{noe1}^2 = \int_{0.01}^{f_{1/f}} \frac{e_{n1/f}^2 f_{1/f}}{f} |df| = e_{n1/f}^2 f_{1/f} \ln \frac{f_{1/f}}{0.01}$$

$$E_{noe4}^2 = \int_{f_p}^{GBW} |e_{n1/f} \cdot A_n|^2 df = \left[e_{n1/f} \cdot \left(1 + \frac{C_d}{C_f}\right) \right]^2 (f_n - f_p)$$

式中, f_n 为噪声等效带宽, 对于一阶系统 $f_n = \pi/2 \times f_x = 1.57f_x$ 。

3 电路分析

欲探测的激光脉冲的上升时间为 5 ns, 由式(17)可计算信号的带宽

$$B = 0.35/tr \quad (17)$$

可知信号带宽为 70 MHz, 选用 PIN 光电二极管结电容 20 pf, 暗电流为 5 nA。放大器选用 Ti 公司 OPA847 低噪声运算放大器, 增益带宽积 3.9 GHz, 输入电压噪声 0.85 nV/sqrt(Hz) ($f > 1$ M), 输入电流噪声 2.5 pA/sqrt(Hz) ($f > 1$ M), 输入电容 3.7 pf。设计中 $R_f = 5.3$ k Ω , $C_f = 0.43$ pf, 原理图如图 6^[8]。

分别计算出电路的 $f_i = 1.26$ MHz, $f_p = 70$ MHz, $f_x = 70$ MHz。反馈电阻热噪声由式(5)可计算得: $E_{noR} = 9.8 \times 10^{-5}$ V。

电流噪声由光电二极管的偏置电流及放大器的

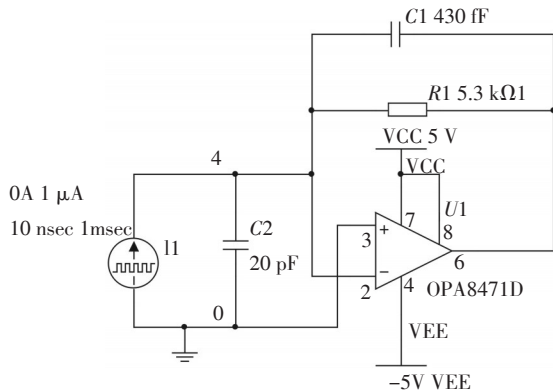


图6 光电探测原理图

电流噪声产生, 光电二极管的偏置电流为 5 nA, 由式(7)可计算 $I_{nodiode}^2 = 2qIB = 1.76 \times 10^{-19}$ A², 放大器电流噪声为 $I_{noi}^2 = 6.9 \times 10^{-16}$ A², $E_{noi}^2 = E_{nodiode}^2 + E_{noi}^2 = (I_{nodiode}^2 + I_{noi}^2)R^2 = 1.94 \times 10^{-8}$ V², 可计算得电流噪声产生输出噪声电压为 $E_{noi} = 1.4 \times 10^{-4}$ V。

通过计算, 电压噪声 $E_{noe1} = 3.6 \times 10^{-6}$ V; $E_{noe2} = 0.43 \times 10^{-6}$ V; $E_{noe3} = 2.2 \times 10^{-4}$ V; $E_{noe4} = 3 \times 10^{-4}$ V。总电压噪声 $E_{noe} = \sqrt{E_{noe1}^2 + E_{noe2}^2 + E_{noe3}^2 + E_{noe4}^2} = 3.72 \times 10^{-4}$ V。总输出噪声 $E_{no} = \sqrt{E_{noR}^2 + E_{noi}^2 + E_{noe}^2} = 4.1 \times$

4 结 论

通过上述分析可看出系统的主要噪声源为放大器的电压噪声, 其中高频段的电压噪声为主要成分, 放大器输入端的电压噪声在高频段会有较高增益, 增益来源于光电二极管的结电容及反馈电阻周围的杂散电容导致的噪声增益。降低光电二极管的结电容可降低系统的噪声增益, 可降低系统噪声, 所以光电二极管的结电容对光电探测电路的性能有较大影响。

通过计算还可看出, 放大器的电流噪声所占比重低于电压噪声, 这是由于放大器的电流噪声在高频处并没有像电压噪声那样获得高增益。但是, 当反馈电阻较大时, 放大器输入端电流噪声及探测器的电流噪声会通过反馈电阻在输出端产生较大的噪声。

由上述分析可得出设计光电探测电路的原则: (1) 应选择具有较低结电容的光电二极管, 因为电压噪声与光电二极管的结电容成正比; (2) 应根据设计中反馈电阻的大小选择不同类型的放大器, 如当反馈电阻大于几百千欧时, 应选择 FET 输入放大器; (3) 因电路噪声集中于高频段, 应根据光电信号的带宽, 合理设计放大电路的带宽, 压缩噪声带宽。

参考文献

- [1] 霍成文, 李伟, 李进, 等. 光电探测微弱信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报, 2005, 22(3): 259-262.
- [2] 陈张玮, 李玉和, 李庆祥, 等. 光电探测器前级放大电路设计与研究[J]. 电测与仪表, 2005(6): 32-34.
- [3] 占建明, 汶德胜, 王宏, 等. 基于光电二极管的前置放大电路噪声分析[J]. 集成电路设计与应用, 2011, 36(2): 304-306.
- [4] 周胜海, 郭淑红. 基于低噪声运放的传感器前置放大器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2006(9): 38-40.
- [5] Jerald Graeme. Photodiode amplifiers op AMP solutions[M]. US: McGraw-Hill, 1995: 87-105.
- [6] 姜先申, 韩焱. 光电探测器噪声分析及降低噪声的方法[J]. 电子质量, 2004(8): 80-81.
- [7] 胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 52-55.