

文章编号: 1672-8785(2014)09-0031-06

猫眼逆向调制激光通信接收放大电路的设计

杨继光¹ 孙华燕² 樊桂花²

(1 装备学院研究生院, 北京 101416 ;

2 装备学院光电装备系, 北京 101416)

摘 要: 猫眼逆向调制激光通信由于通信速率高, 回波信号微弱, 对接收放大电路提出了低噪声、高增益和宽带宽的严格要求。首先分析了猫眼逆向调制激光通信链路模型和信噪比对误码率的影响。然后, 根据系统设计指标分析了电路的带宽、增益和噪声限度等性能参数; 在此基础上设计了由跨阻放大模块和增益可变主放大模块构成的接收放大电路。最后, 计算了电路的总噪声, 并对电路的响应特性进行了仿真。该接收放大电路的带宽达到 140 MHz, 信号增益大于 70 dB, 总噪声电流约为 1.34×10^{-7} A。结果表明, 该设计能满足系统后续的数据处理要求。

关键词: 激光通信; 猫眼效应; 光电调制器; 接收电路; 误码率

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.007

Design of Receiving Amplifier Circuit for Cat's Eye Modulating Retro-reflecting Laser Communication

YANG Ji-guang¹, SUN Hua-yan², FAN Gui-hua²

(1. Graduate Department of The Equipment Academy, Beijing 101416;

2. Department of Photoelectric Equipment, the Equipment of Academy, Beijing 101416)

Abstract: Because of high communication speed and weak echo signals, cat's eye modulating retro-reflecting laser communication has strict requirements of low noise, high gain and wide bandwidth for receiving amplifier circuits. Firstly, the influence of link models for cat's eye modulating retro-reflecting laser communication and Signal-to-Noise Ratio (SNR) on Bit Error Rate (BER) is analyzed. Then, the parameters such as circuit bandwidth, gain and noise limit are analyzed according to the performance specifications of the system. On this basis, a receiving amplifier circuit consisting of a transimpedance preamplifier module and a main amplifier module with adjustable gain is designed. Finally, its total noise is calculated and its response characteristics are simulated. It has the bandwidth of 140 MHz, the signal gain greater than 70 dB and the total noise current about 1.34×10^{-7} A. The result shows that the design of the circuit can meet the requirement of following data processing of the system.

Key words: laser communication; cat's eye ; photoelectric modulator; receiving circuit; bit error rate

收稿日期: 2014-06-26

作者简介: 杨继光 (1989-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向空间光电信息处理与对抗。

E-mail: buaayjg@163.com

0 引言

猫眼逆向调制激光通信 (Cat's eye modulating retro-reflecting free space optical communication, CEMRR FSO) 通过用猫眼逆向调制器 (Cat's eye modulating retro-reflector, CEMRR) 代替传统的激光通信终端来建立通信链路, 简化了捕获跟踪瞄准 (Acquiring, Tracking and Pointing, ATP) 过程, 大幅减小了系统的功耗、重量和体积。美国、瑞典、英国和澳大利亚等国的相关机构从上世纪 90 年代末开始对该技术开展理论、仿真和关键技术及演示试验研究^[1-4]。由于受双程通信链路衰减以及大气闪烁噪声的影响, 回波接收的信噪比很低, 因而宽带宽、低噪声和高增益接收放大电路的设计成为接收系统的关键技术。

1 CEMRR FSO 的通信原理和链路模型

CEMRR FSO 系统结构如图 1 所示。工作时, 主动端发射连续光束照射 CEMRR, CEMRR 接收入射光束, 并将其聚焦到位于焦平面的光学调制器上。需要传递的信息通过驱动电路驱动光学调制器, 然后调制后加载了信息的光束原路返回到主动端, 主动端接收系统接收返回的调制光束, 并进行解调, 恢复传递信息, 完成整个通信过程。

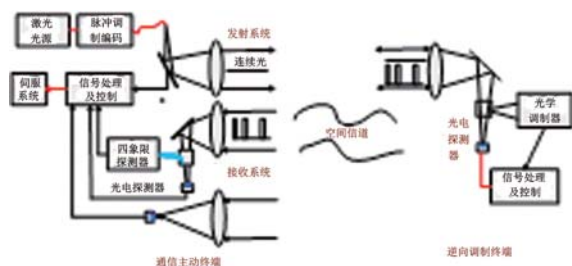


图 1 CEMRR FSO 通信系统原理

主动端的接收回波功率 P_{rec} 可近似表达为

$$P_{red} = \frac{P_t \tau_t \tau_{atm}^2 \tau_{MRR}^2 \tau_r \rho D_{MRR}^2 D_r^2 \cos \alpha}{R^4 \theta_t^2 \theta_r^2} \quad (1)$$

式中, P_t 为出射光功率, τ_t 为发射光学系统的透过率, τ_{MRR} 为猫眼光学系统的透过率, τ_r 为接收光学系统的透过率, ρ 为调制器的反射

率, D_{MRR} 为猫眼光学系统的口径, D_r 为接收光学系统的口径, α 为通信激光束相对猫眼光学系统光轴的夹角, R 为通信距离, θ_t 为出射激光的发散角, τ_{atm} 为大气透过率, θ_r 为接近衍射极限的逆向回波发散角, 分别表示为

$$\tau_{atm}(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V_M} \times \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^b \times R\right] \quad (2)$$

$$\theta_r = \frac{1.22\lambda}{D_{MRR}} \quad (3)$$

设波长 $\lambda=850$ nm, $P_t=50$ mW, $\tau_t=0.9$, $\tau_{MRR}=0.8$, $\tau_r=0.9$, $\rho=0.8$, $D_{MRR}=50$ mm, $D_r=200$ mm, $\theta_t=1$ mrad, 水平大气的能见度 $V_M=20$ km 时 $b=1.3$, 得到 P_{rec} 和 R 的关系曲线, 如图 2 所示。可以看出, P_{rec} 随 R 的增大而迅速衰减, $R > 5$ km 时, P_{rec} 在 μ W 量级, 甚至更小。因此, 在满足通信带宽要求的前提下, CEMRR FSO 接收放大电路还要具有高增益和低噪声性能。

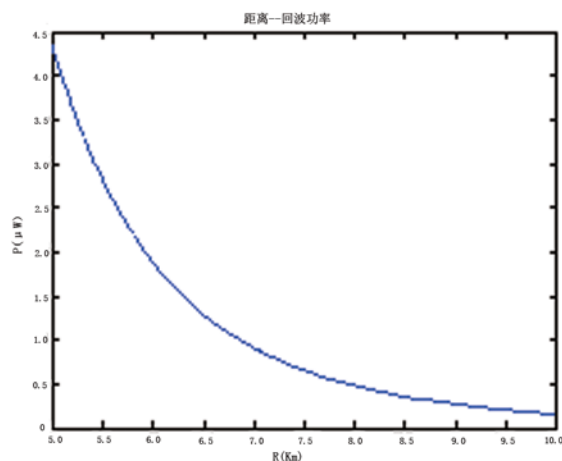


图 2 回波功率与距离的关系曲线

2 接收放大电路的性能指标分析

系统采用 850 nm 激光器, 最小可接收功率为 5μ W, 通信速率为 100 Mbps, 通信误码率小于 10^{-6} ; 调制方式采用 OOK 二进制强度调制 / 直接探测方式; 调制对比度为 10:1。设计电路性能的指标如下:

采用 OOK 二进制数字调制方式时, 接收机带宽 BW 与通信速率 B 满足

$$BW = \frac{2}{\pi} B = 0.64B \quad (4)$$

所以, 接收放大电路的带宽为 64 MHz, 在一定带宽余量下设计带宽大于 100 MHz。

在接收机噪声概率密度函数满足高斯分布的近似下, 误码率可以表示为^[5]

$$BER = \frac{1}{2} [erfc(\frac{Q}{\sqrt{2}})] \approx \frac{\exp(-\frac{Q^2}{2})}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{i_1 - i_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (6)$$

式中, $erfc$ 是补余误差函数, i_1 和 i_0 分别对应码元“1”和码元“0”的平均信号光电流, σ_1 和 σ_0 是相应码元标准差形式的噪声。误码率与码元“1”、“0”的信噪比 i_1/δ_1 、 i_0/δ_0 有密切联系, 只有接收信噪比符合要求, 才能在指定误码率下从回波光信号恢复信息。

在水平路径、点接收和各向同性弱湍流条件下, 系统接收端对数光强起伏方差为^[6]

$$\sigma_{I'}^2 = 1.23 C_n^2 K^{7/6} R^{11/6} \quad (7)$$

式中, C_n^2 是大气湍流折射率的结构常数, $K = 2\pi/\lambda$ 是波数, R 是传输距离。

对于 CEMRR FSO 双程通信链路, 在考虑猫眼光学系统和接收光学系统的孔径平滑效应时, 对数光强起伏的方差为^[6]

$$\begin{aligned} \sigma_I^2 &= G_{MRR} \sigma_{I'}^2 G_r \\ &= [1 + 1.062 (\frac{K D_{MRR}^2}{4R})^{7/6}]^{-1} \sigma_{I'}^2 [1 + 1.062 (\frac{K D_r^2}{4R})^{7/6}]^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, G_{MRR} 和 G_r 分别为猫眼光学系统和接收光学系统对平面波的孔径平滑因子。

码元“1”和码元“0”的闪烁噪声 σ_{i_1} 和 σ_{i_0} 分别为

$$\sigma_{i_1} = \sigma_I^2 i_1 \quad \sigma_{i_0} = \sigma_I^2 i_0 \quad (9)$$

忽略探测器的自身噪声和光电流散粒噪声, 码元“1”和码元“0”的主要噪声是闪烁噪声和电路噪声。为了确定接收放大电路的噪声限度, 考虑两种极限情况:

第一种, 接收放大电路的噪声远大于闪烁噪声, 误码率用调制对比度 ε 和信噪比表示为

$$BER = \frac{1}{2} [erfc(\frac{\varepsilon - 1}{\sqrt{2(\varepsilon + 1)}} SNR)] \quad (10)$$

$BER \leq 10^{-6}$, $\varepsilon = 10$ 时, 解得信噪比最小为 $SNR=5.7$, 对应闪烁噪声最大值。

第二种, 接收放大电路噪声为主要噪声, 闪烁噪声可以忽略不计时

$$Q = \frac{i_1 - i_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\varepsilon - 1}{2\varepsilon} SNR \quad (11)$$

计算得到 $SNR = 10.4$, 对应接收放大电路噪声的最大值。

Thorlab 公司 FDS010 的 PIN 光电探测器的响应度为 0.44 A/W。最小可接收功率为 5 μ W 时, 其最小光电流为 2.1 μ A, 闪烁噪声 σ_i 和接收电路噪声 σ_{PCB} 最大为

$$\sigma_i = 3.85 \times 10^{-7} A \quad \sigma_{PCB} = 2.1 \times 10^{-7} A$$

接收放大电路放大输入信号后, 将信号传输给数据提取和时钟恢复等后续电路, 以恢复信息。时钟和数据恢复芯片 ADN2814 要求最小输入差分信号幅值为 5 mV, 所以接收放大电路的增益至少为 70 dB。

3 接收放大电路的设计

接收放大电路由前置接收、前置放大和主放大模块组成, 原理如图 3 所示。前置接收实现光信号到光电流的转换, 前置放大将电流脉冲信号转换成电压脉冲信号。由于一般不能同时满足宽带宽和高增益的要求, 所以主放大将进一步放大电压脉冲信号, 以满足信号的处理要求。

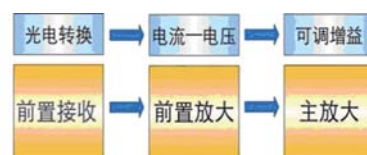


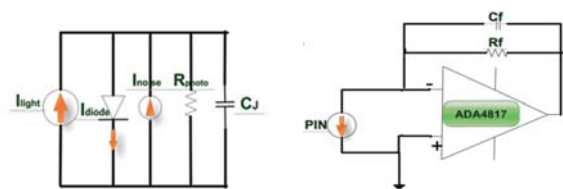
图 3 回波接收功能电路的结构框图

3.1 前置接收和放大

前置接收模块的核心是光电二极管探测器, 图 4(a) 为等效模型^[7], 等效为恒流源、噪声源和自身分流电阻、电容并联的结构。表 1(a) 为 FDS010 探测器的特性参数。用 2 个特性相同

的光电二极管分别接收信号光和背景光^[8],可消除背景光和探测器暗电流等影响。

前置放大模块的噪声性能不仅与前置放大器的固有噪声有关,还与电路设计结构和参数的选取有关^[9]。根据 FDS010 结电容值,选用结型场效应管运放 ADA4817 作为低噪前置放大器^[10]。表 1(b) 是其主要参数,采用兼顾高灵敏度、宽带宽和低噪声性能的跨阻结构^[11],如图 4(b)所示, R_f 是跨阻, C_f 是并联电容。



(a) 光电二极管探测器模型

(b) 运算跨阻结构

图 4

表 1(a) 光电二极管 FDS010 规格

参数	符号	值
响应度	$R_{\lambda p}$	0.44 A/W
结电容	C_J	6 pf
结电阻	R_{photo}	> 1GΩ
噪声功率	NEP	0.12 pw/ $\sqrt{Hz}$

表 1(b) ADA4817 规格参数

参数	符号	值
输入差分电容	C_{dif}	0.1pf
输入共模电容	C_{com}	1.3pf
输入电压噪声	$e_{ni}(100KHz)$	4nV/ $\sqrt{Hz}$
输入电流噪声	$i_{ni}(100KHz)$	2.5fA/ $\sqrt{Hz}$

跨阻决定了前置放大模块的增益,理论上越大越好,但增益增大会使带宽减小,所以在满足带宽要求的前提下须设计跨阻值,增益不足的部分可由主放大模块提供。信号带宽最大时,具有 45° 相位余量的并联电容取值为^[12]

$$C_f = \sqrt{\frac{C_{in}}{2\pi R_f GBP}} \quad (12)$$

式中, $C_{in} = C_J + C_{dif} + C_{com} = 7.4pf$ 代表光电二极管和前置放大器反向输入端对地的复合电容, GBP 为前置运放增益带宽积。带宽 100 MHz 的前置放大电路 $R_f = 1k\Omega$, $C_f = 1.6pf$ 。

如图 5 所示,前置接收放大电路的原理图包括探测器、跨阻及差分电路和接口电路三部分。跨阻输出的两路信号中共模成分不会在阻值

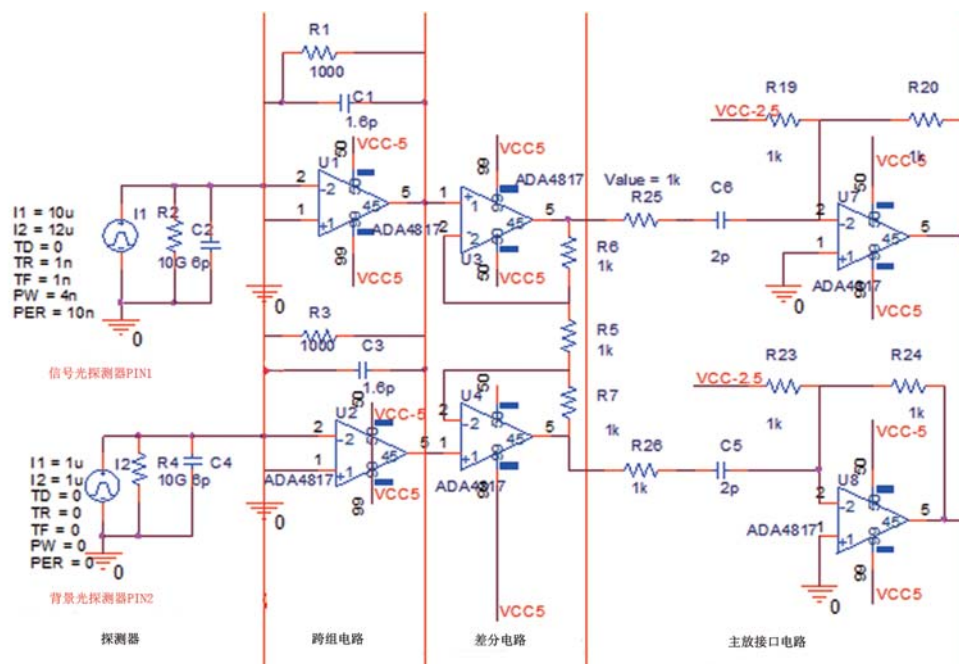


图 5 前置接收电路的原理图

R5 上产生电流, 因而差分电路不会有共模输出, 可有效地消除背景光噪声和探测器自身共模噪声的影响。主放大电路要求输入共模电压为 2.5 V, 接口电路采用加法器结构实现。

图 6 为跨阻输出、差分输出和总前置输出的幅频特性, 仿真带宽为 140 MHz, 单端增益为 60 dB。

图 7 为对共模电流为 11 μ A、差模为 2 μ A

的电流小脉冲信号仿真, 峰值输出为 3.52 mV。

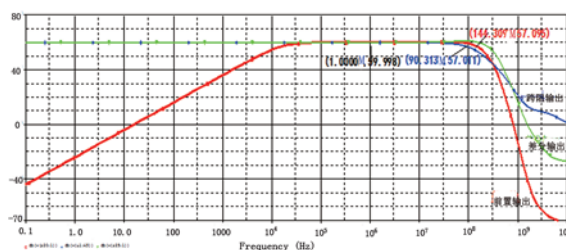


图 6 前置接收电路幅频的特性曲线

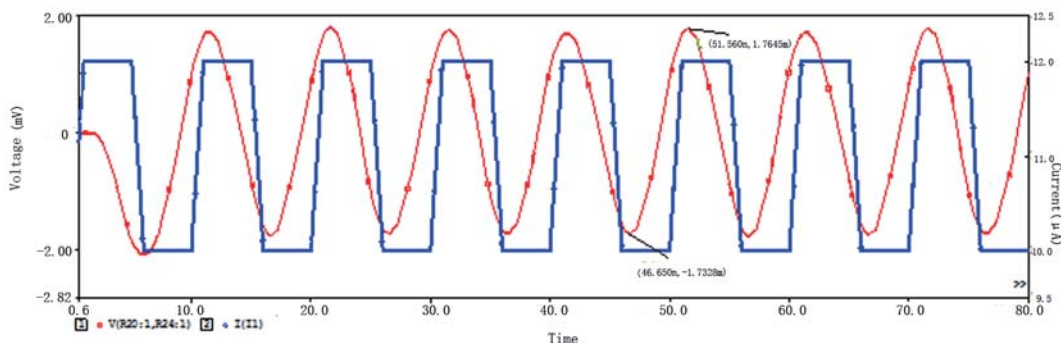


图 7 前置接收电路的瞬态特性曲线

3.2 主放大电路的设计

主放大模块一般具有宽带宽和增益可调节等特点。本文选用高速、高性能可编程控制的差

分放大器 LMH6882 芯片, 增益设为 20 dB, 前置电路的峰值输出为 3.5 mV, 差分信号经过主放大之后为 33 mV, 仿真结果如图 8 所示。

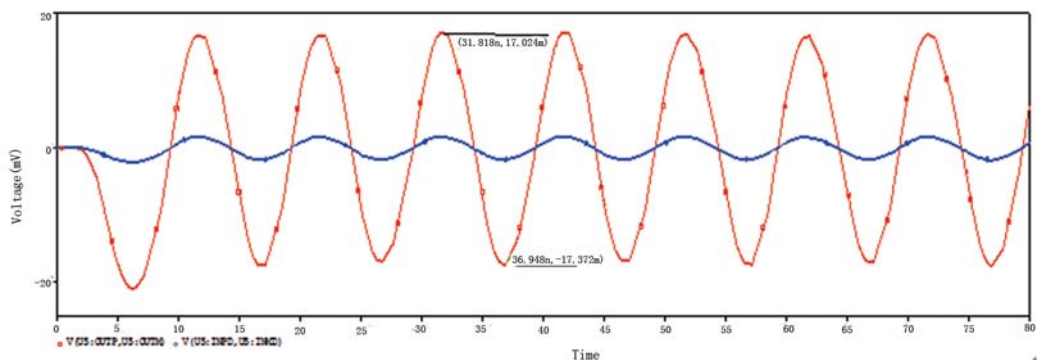


图 8 主放大电路的信号输出瞬态特性曲线

4 接收放大电路的总噪声分析

光电流和暗电流散粒噪声以及 ADA4817 输入电流噪声一般很小, 可以忽略。接收端的噪声主要包括探测器输出噪声、前置放大电路噪声和主放大电路噪声三部分。

根据 FDS010 噪声等效功率 NEP, 计算得到

探测器输出电流的噪声密度为

$$i_{PIN} = NEP \times R_{\lambda p} = 52.8 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (13)$$

前置放大电路噪声主要是跨阻噪声和运放输入电压噪声。跨阻电流的噪声密度 i_{n-R_f} 为

$$i_{n-R_f} = \sqrt{4KT/R_f} \quad (14)$$

式中,玻尔兹曼常数 $K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, 材料温度 $T=300 \text{ K}$, $i_{n-R_f}=1 \text{ k}\Omega$, 则 $i_{n-R_f}=4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

图 9 是跨阻放大模块的噪声增益和频率的关系。由于小于零点 f_z 的低频段噪声增益很小, 点 f_z 到 f_p 之间的斜线以及 f_p 之后 ADA4817 开环幅频曲线满足斜率 20 dB/dec 。因此, 以 f_p 为顶点的等腰三角形面积作为输出电压噪声, 三角形顶点增益为 $1+C_{in}/C_f$, 转折频率点 f_z 为

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_f(C_{in} + C_f)} = 17.7 \text{ M} \quad (15)$$

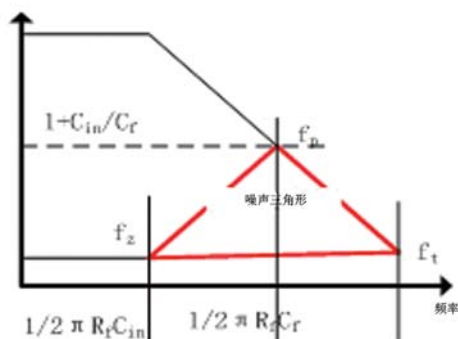


图 9 跨阻放大噪声的增益传递函数
输入电压噪声 e_{ni} 的输出电压噪声为

$$V_{n-e_{ni}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{in}}{C_f}\right) \sqrt{e_{ni}^2 \Delta f} \quad (16)$$

代入 $\Delta f = 100 \text{ M} - f_z$, 输入电流的噪声密度为

$$i_{n-e_{ni}} = \frac{V_{n-e_{ni}}}{R_f \sqrt{\frac{1}{2\pi R_f C_f} \times \frac{\pi}{2}}} = 6.7 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (17)$$

主放大芯片 LMH6882 的噪声系数为 9.7 dB, 增益设置为 26 dB, 得到 LMH6882 的等效输入噪声电流 $i_{z-in}^2 = 2.2 \times 10^{-8} \text{ A}$, 等效输入电流的噪声密度为

$$i_{z-amp} = \frac{i_{z-in}^2}{\sqrt{\frac{\pi}{2} \times \frac{1}{2\pi R_f C_f}}} = 1.4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (18)$$

接收端的总等效输入电流噪声密度为

$$i_{zn} = \sqrt{i_{PIN}^2 + i_{n-R_f}^2 + i_{n-e_{ni}}^2 + i_{z-amp}^2} = 8 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (19)$$

总等效输入电流噪声为

$$I_{rec-noise} = i_{zn} \times \sqrt{\frac{1}{2\pi R_f C_f} \times \frac{\pi}{2}} = 1.2 \times 10^{-7} \text{ A} < \sigma_{PCB} \quad (20)$$

接收信噪比为

$$SNR = \frac{I_{sig}}{I_{rec-noise}} = 18 \quad (21)$$

5 结论

采用理论分析、数值计算和 EDA 仿真的方法设计了猫眼逆向调制激光通信接收放大电路, 计算得到了电路的总等效输入噪声电流 $1.34 \times 10^{-7} \text{ A}$ 。SPICE 仿真电路的带宽为 140 MHz, 信号的增益范围为 72 dB~92 dB。结果满足系统的设计要求, 为下一步猫眼逆向调制激光通信链路的实际性能测试提供了硬件基础。

参考文献

- [1] Moore C I, Burris H R, Rabinovich W S, et al. Lasercomm Demonstration During US Navy Trident Warrior 06 Forcenet Exercise[C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE*, 2007: 17-20.
- [2] Rabinovich W S, Mahon R, Goetz P G, et al. 45 Mbps Cat's Eye Modulating Retro-reflector Link over 7 km [C]. *SPIE*, 2006, **63040**: 63040Q.
- [3] Goetz P G, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Modulating Retro-reflector Lasercom Systems at the Naval Research Laboratory[C]. *Military Communications Conference, IEEE*, 2010: 1601-1606.
- [4] Goetz P G, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Modulating Retro-Reflector Lasercom Systems for Small Unmanned Vehicles[J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2012, **30**(5): 986-992.
- [5] 马春林, 崔元顺. 大气湍流对激光通信系统的影响分析 [J]. *红外*, 2010, **31**(8): 24-27.
- [6] 曹瑞卿. 空-地光通信大气信道特性的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 26-28.
- [7] 郑培超, 于斌, 刘克铭, 等. 硅光二极管光电检测电路的研究与设计 [J]. *重庆邮电大学学报 (自然科学版)* ISTIC, 2013, **25**(4): 484-488.
- [8] 胡红梅, 韩建中, 陆敏江, 等. 计算机间串口大气激光通信的实现 [J]. *半导体光电*, 2002(6): 395-397.
- [9] 张小军. 1.25 Gbps 光接收机前置放大器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 7.
- [10] 王永纲. APD 探测器低噪声前端电子学研究 [J]. *核电子学与探测技术*, 2006, **26**(3): 280-283.
- [11] 何玲玲, 张仲, 葛立峰. 基于 Labview 的微弱光电信号采集与处理系统的设计 [J]. *电测与仪表*, 2010, **47**(6): 65-68.
- [12] Analog Devices. Compensating for the Effects of Input Capacitance on VFB and CFB Op Amps Used in Current-to-Voltage Converters [EB/OL]. http://www.analog.com/static/imported_files/zh/tutorials/MT-059-cn.pdf.