文章编号：1672-8785(2018)06-0027-07

无线光传输系统接收机的设计及特性分析

张子儒[1,2,3] 丁 雷[2,3] 张冬冬[2]
(1. 中国科学院大学，北京 100049；
2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海 200083)

摘 要：设计和搭建了一个无线光传输系统。针对系统接收机的稳定性和信噪比要求，详细推导和分析了接收机的光电二极管特性、电路的稳定性和带宽、接收机的噪声和信噪比。详细分析了接收机中噪声的来源，给出了其影响因素及其计算方法，并参考实验器件参数实现了定量计算。在 LTspice-IV 上对光电二极管前置放大电路进行了建模和仿真，分析了其信号增益和噪声特性，其结果与理论分析接近。对系统进行了 1 MHz 方波传输实验测试，在接收端能得到较好的方波信号，能为后续的信号处理模块提供稳定可靠的前级信号。

关键词：无线光传输；光电二极管；前置放大；相位裕量；噪声增益；LTspice-IV 仿真

中图分类号：TN219 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.005

Design and Characteristics Analysis of Receiver for Wireless Optical Transmission System

ZHANG Zi-ru[1,2,3], DING Lei[2,3], ZHANG Dong-dong[2]
(*1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A wireless optical transmission system is designed and built. According to the system receiver stability and signal-to-noise (SNR) requirements, the photodiode characteristics, circuit stability and bandwidth, receiver noise and signal-to-noise ratio of the receiver are deduced and analyzed in detail. The noise source in the receiver is analyzed in detail and the influencing factors and calculation methods are given. The quantitative calculation is performed according to the parameters of the experimental components. The photodiode preamplifier circuit is modeled and simulated on LTspice-IV. Its signal gain and noise characteristics are analyzed. The results are close to those of theoretical analysis. A 1 MHz square wave transmission experiment is made on the system. Good square wave signals can be obtained at the receiving end. This result shows that it can provide stable and reliable pre-stage signals for the subsequent signal processing module.

收稿日期：2018-04-02

基金项目：中科院战略性先导科技专项项目(XDA15012200)；中科院上海技术物理研究所创新专项(CX-22)

作者简介：张子儒(1991-)，男，江西鄱阳人，博士生，主要从事无线光通信与光电转换研究。
E-mail：zhangziru1991@163.com

Key words：wireless optical transmission；photodiode；pre-amplification；phase margin；noise gain；LTspice-IV simulation

0 引言

随着光学技术、半导体技术和通信技术的发展，光电技术已成为获取和传输相关信息(如光、力、温、声、电)的重要手段[1]。无线光传输用无线光代替传统传输电缆，通过在发射端将输入电信号转换为光信号，在接受端将光信号转换为电信号,实现相关信息的传输[2]。研究发现，在 LED-PIN 无线光传输系统中，主要是接收机会对系统的相关性能如带宽、稳定性、噪声特性产生影响。接收机经光电转换得到的光电流通常很微弱，接收机的信号容易受各种噪声干扰。外部干扰包括光源光强随机波动、光调制噪声、光传输介质湍流、背景杂散光以及电路的电磁干扰等。这些干扰可以通过一些措施如稳定光源、遮断杂光、电气屏蔽、滤波来减弱或消除。而光电转换器件、输入电路和前置放大器等器件的固有噪声是另一主要的噪声来源。这些内部噪声拥有宽频谱范围，与有用信号同时存在，降低了光传输系统的性能[3]。

研究发现，在接收机中，系统受光电二极管以及前置跨阻放大电路噪声的影响比较大[4-6]。在设计接收机的光电转换电路时，要尽量减小噪声，提高系统的信噪比[7]。

1 系统接收机简介

系统接收机通过光电二极管接收光脉冲并将其转化为光电流；通过跨阻放大、多级限幅放大、低通滤波和比较电路后转换为所需的电信号；再通过 CAN 控制器和微控制器，最终将数据传输到接收端 PC。其中采用 AD 数字隔离器进行信号的电气隔离，以隔绝 CAN 控制器和接收器前级电路之间的干扰，确保信号稳定传输。接收机的功能架构如图 1 所示。

系统的噪声特性和稳定性主要与接收机前置放大电路有关。本文主要针对系统接收机的光电二极管前置放大电路进行特性分析。

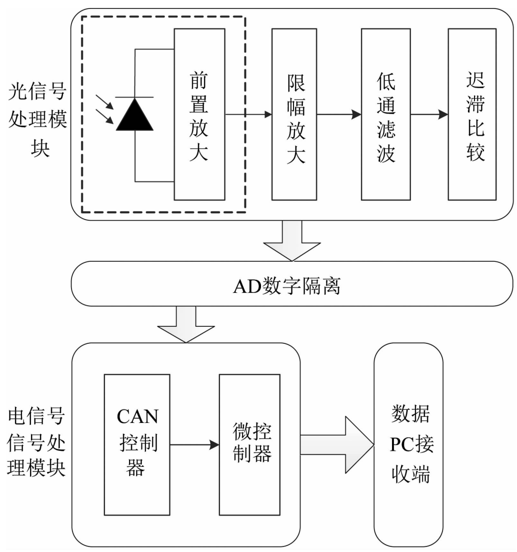


图 1 接受机功能架构

2 系统特性分析

2.1 光电二极管的特性

由于实际使用的二极管并非理想二极管，因此需使用等效电路模型进行光电二极管的建模。其等效模型是一个光强相关的电流源 I_d、一个大分流电阻 R_{sh} 和一个分流电容 C_{sh} 并联[8]，如图 2 所示。

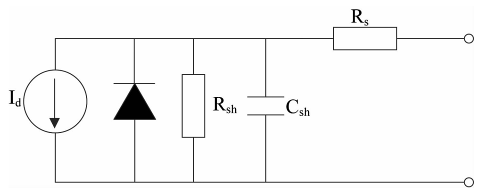


图 2 光电二极管的等效模型

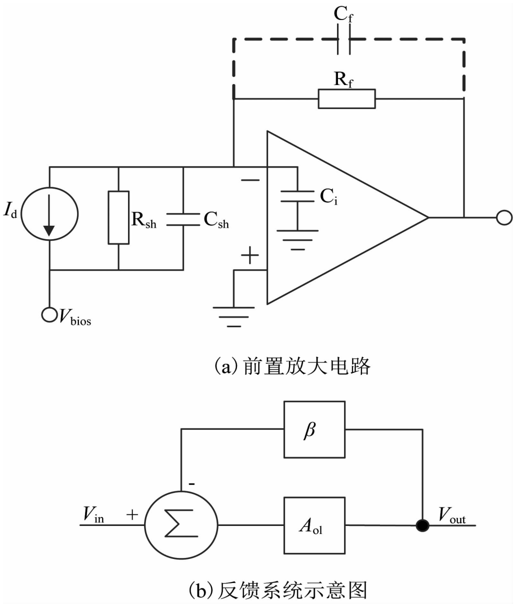
光电二极管的电流 I_d 取决于光电二极管的光灵敏度和接受到的光强度大小，并将在输出端转换为电压信号。

在光电二极管的等效电路中，光电二极管的分流电容 C_{sh} 是影响光电二极管响应速度的关键参数。分流电容 C_{sh} 越小，其频率响应特性就越好。实际应用中，分流电容随光电二极管结点面积的增大而增大。

光电二极管的偏置状态也会影响其特性。一方面，相对于零偏置状态，在施加反向偏置电压时，光电二极管的响应速度更快；但另一方面，反偏置会导致暗电流的产生，并由此产生额外的热噪声。暗电流 I_{dark} 与反向偏置电压 V_R 和分流电阻 R_{sh} 相关：

$$I_{dark}=\frac{V_R}{R_{sh}} \tag{1}$$

2.2 稳定性和带宽分析



(a) 前置放大电路

(b) 反馈系统示意图

图 3 前置放大电路及其反馈系统模型

图 3(a)是光电二极管的前置放大电路。该电路是一个负反馈系统，如图 3(b)所示。A_{ol} 为运放的开环增益，β 为从输出到输入的负反馈：

$$\beta=\frac{U_i}{U_o}=\frac{1}{\left(1+\frac{R_f}{R_{sh}}\right)+SR_f(C_{sh}+C_i)} \tag{2}$$

环路增益为

$$A_{ol}*\beta=\frac{A_{ol}}{\left(1+\frac{R_f}{R_{sh}}\right)+SR_f(C_{sh}+C_i)} \tag{3}$$

系统的幅频特性和相频特性可表示为

$$|A(f)|=\frac{A_{ol}}{\sqrt{\left(1+\frac{R_f}{R_{sh}}\right)^2+[2\pi fR_f(C_{sh}+C_i)]^2}} \tag{4}$$

$$\varphi(f)=\pi-\tan^{-1}\left(\frac{2\pi fR_f(C_{sh}+C_i)}{1+\frac{R_f}{R_{sh}}}\right) \tag{5}$$

其变化曲线如图 4 所示。

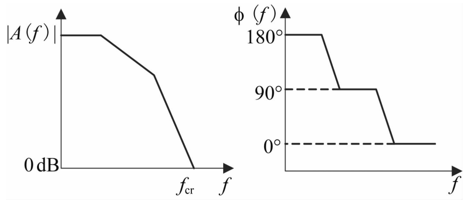


图 4 前置放大电路开环传递函数的特性曲线

该系统开环传递函数的一个极点是由运算放大器的开环响应引起的，一般在低频处；另一个极点 f_{p2} 由反馈电阻以及光电二极管的分流电阻和电容引起，满足：

$$f_{p2}=\frac{R_f+R_{sh}}{2\pi(C_{sh}+C_i)R_f R_{sh}} \tag{6}$$

每个极点导致开环传递函数相移 90°，总共相移 180°。在整个负反馈系统中，其闭环传递函数为

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{A_{ol}}{1+A_{ol}*\beta} \tag{7}$$

在交越频率 f_{cr} 上，环路增益 $A_{ol}*\beta$ 的幅值为 0 dB。如果此时环路增益相移为 180°，则有 $A_{ol}*\beta=-1$。闭环传递函数无穷大，此时输入中任何小的变化都会导致输出中很大的变化，而这又会反馈给输入并继续导致输出中更大的变化，最终会在输出端产生振荡，导致系统不稳定。

为确保工作稳定，引入一个电容 C_f 与 R_f 并联，从而给传递函数添加一个零点。此零点将传递函数跨过 0 dB 时的斜率从 40 dB 每十倍频程降至 20 dB 每十倍频程，从而产生正相位裕量。如果相位裕量太大，可能出现过阻尼，从而导致系统的响应速度下降。如果相位裕量太小，可能会出现欠阻尼，从而导致电路振荡。所以，为了使系统反应速度快而且工作稳定，工程上一般都取 45°相位裕量。

提供 45°相位裕量时，反馈电容为

$$C_f=\sqrt{\frac{C_{sh}+C_i}{2\pi R_f f_{cr}}} \tag{8}$$

此时反馈电阻和反馈电容的取值决定了系统能够工作的信号带宽[9]：

$$f=\sqrt{\frac{f_{cr}}{2\pi R_f\, C_{sh}+C_i}} \tag{9}$$

此时，选择更小的电容可以提供更低的相位裕量和更高的带宽，但输出可能会过度振荡。此外，所有元件都必须留有余地，以保证电路的稳定性。

2.3 噪声及信噪比分析

在图 3(a)所示的光电二极管放大器模型中，噪声增益为

$$G_N=1+\frac{Z_f}{Z_i} \tag{10}$$

式中，Z_f 可视为反馈电阻 R_f 和反馈电容 C_f 的并联阻抗，Z_i 可视为前置跨阻放大器输入电容、PIN 光电二极管的分流电容 C_{sh} 和分流电阻 R_{sh} 的并联阻抗。此传递函数包含多个极点和零点，精确计算相当繁琐，但对一般的商用器件，我们可以进行近似估算。

在接近 DC 的频率处，电阻占主导地位。此时，噪声增益 $G_1=1+R_f/R_i$。由于 $R_{sh}\gg R_f$，噪声增益接近 0 dB。随着频率的提高，电容的阻抗降低，开始成为增益的主导因素。由于 $C_{sh}+C_i\gg C_f$，因此增益开始随着频率的提高而提高。但增益不会无限提高下去，因为反馈电容和电阻形成的极点会阻止增益提高，最终运算放大器的带宽会起作用，使增益开始滚降。电路噪声增益曲线如图 5 中的实线所示。

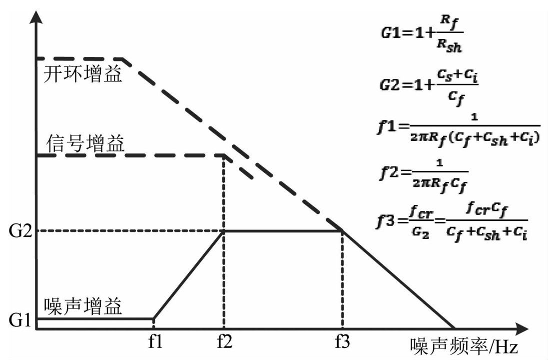


图 5 前置放大电路的增益特性

将输入端各噪声与噪声增益相乘，可得到输出噪声密度。对整个频谱积分，可得到输出噪声。

前置放大电路的等效噪声模型[10−11]如图 6 所示。此时，前置放大电路的噪声源有 5 项，包括放大器电压输入噪声 V_N 和电流输入噪声 I_N、PIN 管热噪声 $V_{N1,P}$、散粒噪声 $V_{N2,P}$ 和跨阻热噪声 $V_{N,Rf}$。输出端的噪声见表 1，其中，k 为波尔兹曼常数，T 为绝对温度，q 为单电子电荷量。

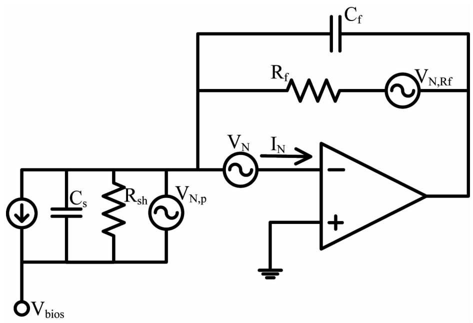


图 6 前置放大电路的噪声等效模型

本项目采用的器件为滨松公司生产的 PIN 光电二极管 S5107 和 ADI 公司生产的高速放大器 ADA4817，器件参数见表 1。前置放大电路输出噪声的计算结果见表 2。

表 1 实验选用的器件参数

参数	数值
PIN 管分流电容 C_{sh}	230 pf
PIN 管分流电阻 R_{sh}	9.1 GΩ
ADA4817 输入电压噪声	4 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$
ADA4817 输入电流噪声	2.5 fA/$\sqrt{\text{Hz}}$
ADA4817 输入电容	1.4 pf
ADA4817 单位增益带宽	410 MHz
R_f	10 kΩ
C_f	4.3 pf

总噪声为各个噪声分量平方和的根：

$$V_{Noise}=\sqrt{5.74e05+185I_P} \tag{11}$$

由于接收到的有效信号光强为微安级，PIN 管散粒噪声可以忽略，噪声的主要来源为放大器电压输入噪声。输出端的信号与接收光电流相关。输出端的信号为

表 2 前置放大电路的各噪声来源及其输出端噪声

噪声来源	输出端噪声	计算结果
V_N	$V_N G_2 \sqrt{\frac{\pi}{2} f_3}$	753.9 μV
I_N	$I_N R_f \sqrt{\frac{\pi}{2} f_2}$	60.2 nV
$V_{N1,P}$	$\sqrt{2\pi k T R_{sh} f_2}\frac{R_f}{R_{sh}}$	32.5 nV
$V_{N2,P}$	$R_f \sqrt{\pi q I_p f_2}$	$13.6\sqrt{I_p}$ μV
$V_{N,Rf}$	$\sqrt{2\pi k T R_f f_2}$	31 μV

$$V_{Signal}=R_f I_P \tag{12}$$

前置放大输出端的信噪比为

$$SNR=20\log\left(\frac{V_{Signal}/2\sqrt{2}}{V_{Noise}}\right) \tag{13}$$

3 接收机仿真和测试结果

3.1 仿真结果

根据选用的器件参数，在 LTspice-IV 中对接收机的前置跨阻放大电路进行了仿真分析。仿真电路如图 3(a)所示，其中，放大器选用 ADA4817，$C_{sh}=230$ pf，$R_{sh}=9.1$ GΩ，$V_{bios}=-5$ V，$R_f=10$ kΩ，$C_f=4.3$ pf，激励为脉冲电流源，其幅值为 50 μA。

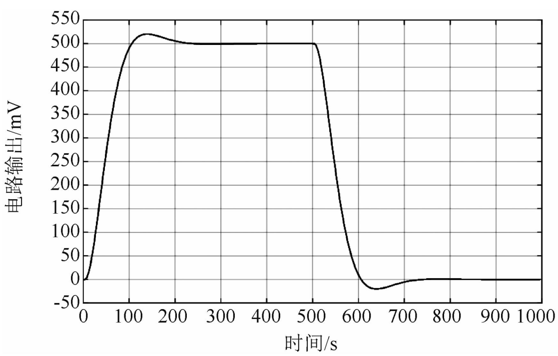


图 7 脉冲响应的仿真结果

图 7 为前置放大电路的脉冲响应瞬态分析图。可以看出，放大电路对输入光电流进行了较好地放大。输出波形中上升时间为 65.4 ns，存在 4.1%过冲。

图 8 为前置放大电路信号增益的频率响应。可以发现，−3 dB 带宽为 5.28 MHz，略小于理论计算的信号带宽 5.8 MHz。

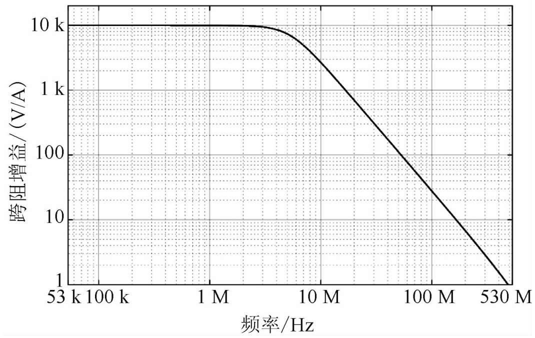


图 8 频率响应的仿真结果

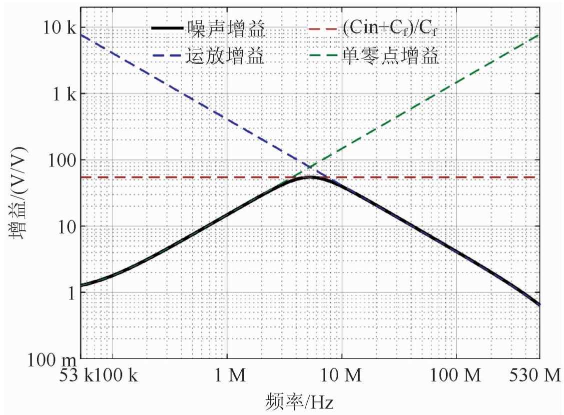


图 9 噪声增益的仿真结果

图 9 所示为噪声增益随频率变化的曲线。可以发现，此设计尽量减少了噪声增益曲线的平坦部分，从而可尽量减少噪声。噪声增益最大为 54.65，略小于理论计算的增益 $G_2=54.81$。

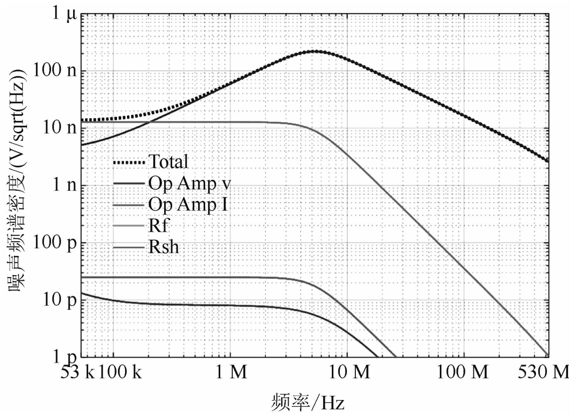


图 10 噪声频谱密度的仿真结果

图 10 给出了各噪声频谱密度随频率的变化。其在频率上积分后可得到噪声变化曲线，

从而可知，输出噪声主要来源于放大器的电压输入噪声。积分后得到的电路噪声结果见表 3。可以发现，结果与理论计算相近。

表 3 前置放大输出噪声

噪声来源	积分结果
运放输入电压噪声	750 μ
运放输入电路噪声	59.9 n
Rf	30.8 μ
Rsh	19.6 μ
总	750 μ

3.2 实验测试

对系统进行方波传输测试，用信号发生器在发射端产生 1 MHz 方波激励信号，通过三极管开关电路驱动 LED 发射光脉冲；脉冲光在传播 2 m 左右后在接收端被 PIN 光电二极管接收，并通过光电转换和前置放大后转换为电压信号。通过示波器测量发射和接受信号以分析光传输情况。

图 11 中，红色波形为信号发生器测得的 LED 串联限流电阻分压，可以较好地表示 LED 驱动电流的变化情况。根据 LED 的器件参数，其上升下降时间为 20 ns，可以认为 LED 的发射光脉冲为类似波形。

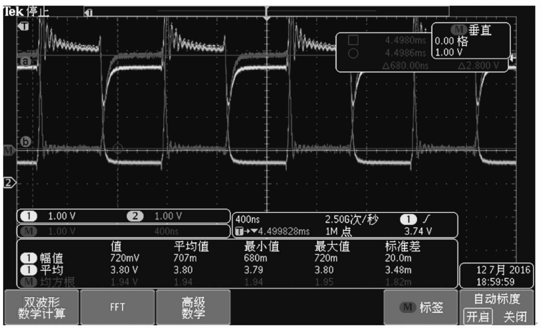


图 11 LED 驱动激励波形

在接收端经过光电转换和前置放大后，得到的波形如图 12 所示。

可以发现，由于 PIN 管暗电流的存在和环境光的干扰，在无发射光时依然在输出端有 54 mV 左右的信号，且存在较大的高频噪声。在其后加入低通滤波和限幅放大后，可以滤去

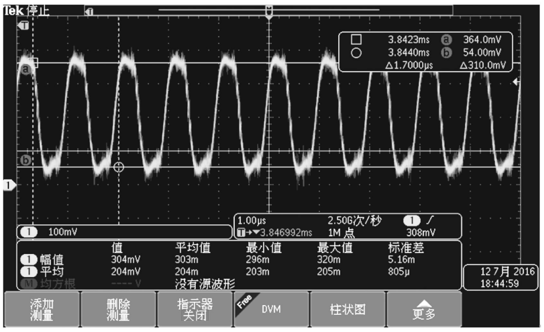


图 12 前置放大后的波形

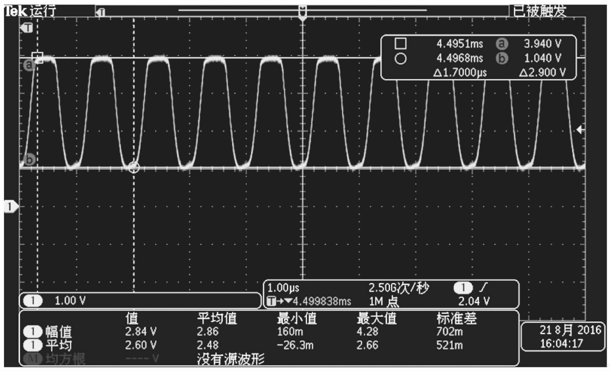


图 13 滤波和限幅放大后的波形

大部分的高频噪声，其波形图如图 13 所示。经过比较器后可以得到所需的传输信号。

4 结论

设计和搭建了一个基于 LED-PIN 的无线光传输系统，对接收机的光电二极管特性、系统稳定性、接收机噪声和信噪比进行了详细推导和分析。分析了其噪声来源。当接收微弱光(μA 级)时，前置放大电路的噪声主要来源于放大器的输入电压噪声。运用实验中的元器件参数对各噪声进行了定量计算和分析，在 LTspice-IV 上对光电二极管的前置放大电路进行了建模和仿真，得到了系统的脉冲响应波形、前置放大电路信号增益的频率响应、前置放大电路的噪声增益和噪声频谱密度曲线，仿真结果与理论分析结果接近。最后对系统进行了方波传输实验，在接收端经前置放大、滤波和限幅放大后，得到了较好的传输信号波形。

参考文献

[1] 刘彬，张秋婵. 光电检测前置放大电路的设计

[J]. **燕山大学学报**，2003，**27**(3)：193-196.

[2] 张正茂，胡心. 基于 PSpice 的光电探测电路仿真分析 [J]. **光电技术应用**，2012，**27**(5)：69-72.

[3] 王林涛，李开成，张健梅. 低噪声光电检测电路的设计和噪声估算 [J]. **武汉理工大学学报(信息与管理工程版)**，2001，**23**(3)：16-18.

[4] 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.

[5] 姜先申，韩焱. 光电探测器噪声分析及降低噪声的方法 [J]. **现代电子技术**，2004，**23**(8)：3-4.

[6] 刘正岐，付文羽. 影响光电检测电路信噪比的因素 [J]. **延安大学学报：自然科学版**，2003，**22**(4)：41-43.

[7] 王立刚，建天成，牟海维，等. 基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计 [J]. **东北石油大学学报**，2009，**33**(2)：88-92.

[8] 付文羽. 硅光电二极管的线性度及信噪比分析 [J]. **半导体光电**，2003，**24**(4)：267-269.

[9] 刘日龙，殷德奎. 激光干涉仪光电检测电路的设计 [J]. **半导体光电**，2010，**31**(2)：284-287.

[10] 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]. **半导体技术**，2011，**36**(4)：304-306.

[11] 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，**46**(9)：38-40.