

激光回波小信号宽带放大器设计*

陈小宇 刘佐牙

(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

摘要:设计了一款激光回波小信号宽带低噪声放大器。选用低噪声、高带宽电流反馈型差分运算放大器 THS4509,采用两级放大电路结构以获得较大的放大倍数,利用传输线变压器实现输出信号由双端到单端转换。为减小噪声,采用过渡带特性最好的椭圆低通滤波器滤除带外噪声。经实验验证,该放大器具有 40 dB 放大倍数、120 MHz 带宽和小于 10 mV(pp) 的系统噪声,能对各种反射率条件下不同目标反射回的微弱激光小信号进行有效放大,较好地解决了远距离和低反射率目标物体测距问题,实际测试测距量程可达 450 m。

关键词:激光测距;宽带放大器;噪声;带宽

中图分类号: TN722.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design of wideband amplifier of weak laser echo signal

Chen Xiaoyu Liu Zuoya

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A low-noise and wide-band amplifier was designed for the weak laser echo signal. We chose the CFB differential operational amplifier THS4509 with low noise and high bandwidth as the core component; a two-stage amplification circuit was adopted in order to obtain a larger gain, and a transmission-line voltage transformer was used to change the output signal from double-ended to signal-ended. To reduce the noise, we used a low-pass elliptic filter with the best transition zone features to filter out the noise outside the band. The experiences demonstrated that the amplifier had the characteristics of 40 dB gain, 120 MHz bandwidth, and its noise was less than 10mV(pp). It could effectively amplify the weak laser echo signal reflected by the different target objects even with a variety of reflectivity. Furthermore, the amplifier with the above characteristics performed better in solving the problem of long distance and low reflectivity, and its maximum measuring rang can reach 450m proved by actual tests.

Keywords: laser ranging; wideband amplifier; noise; bandwidth

1 引言

与其他测距技术相比,激光测距具有抗干扰能力强、测距精度高、测量距离远和能全天候工作等诸多优点,获得了广泛应用^[1-2]。近年来,以激光测距技术为基础的三维激光扫描仪,正在推动移动测量、三维实景地图等领域的快速发展^[3-5],在国民经济和国防建设中具有非常重要的意义^[6]。

早期的激光测距系统是通过测量激光发射脉冲与回波脉冲之间的时间间隔来获取距离信息,缺点是没有充分利用回波波形所包含的丰富信息。新一代激光测距系统利用高速 AD 芯片对激光回波波形进行采样,获取目标回波的全波形信息,通过特定的波形分拣和反演算法可以实现目标特征识别与提取^[7-8]。新老激光测距

系统都需要对激光回波信号进行有效放大,以提高测距精度和测距量程。

激光回波小信号放大需要解决以下几个技术难题:

- 1) 大放大倍数,对于远距离和低反射率的反射物,需要大的放大倍数对微弱脉冲信号进行有效放大;
- 2) 宽带宽,三维激光扫描仪采用的激光器单个脉冲的脉宽在 ns 级,能量分布的带宽很宽;
- 3) 低噪声,降低噪声,提高信噪比,提高测距的精度^[9]。

针对上述关键难题,结合激光测距的实际需求,设计了一种低噪声宽带放大器电路,放大倍数可达 40 dB、带宽 120 MHz、系统噪声小于 10 mV(pp),能够满足 450 m 的测距量程需求。

收稿日期:2015-06

* 基金项目:湖北省自然科学基金面上(2014CFB656)、华中师范大学基本科研业务基金(CCNUI14A02006)项目

2 激光小信号宽带放大器设计

2.1 激光脉冲信号分析

通常可认为激光回波脉冲信号波形为钟形波^[10-11],类高斯波形,其波形特点如图 1 所示,其函数表达式为:

$$f(t) = Ae^{-(t/\tau)^2} \quad (1)$$

对式(1)进行傅里叶变换可得:

$$G(W) = \sqrt{\pi}A\tau e^{-(\pi\omega)^2/4} \quad (2)$$

通过计算可得,钟形波信号能量的 90% 都集中在频带宽度 $\Delta f = 0.45/\tau$ 内,即对于此频带内的脉冲信号进行放大,系统可得到最高信噪比。图 2 为使用的激光器实测激光脉冲信号波形。

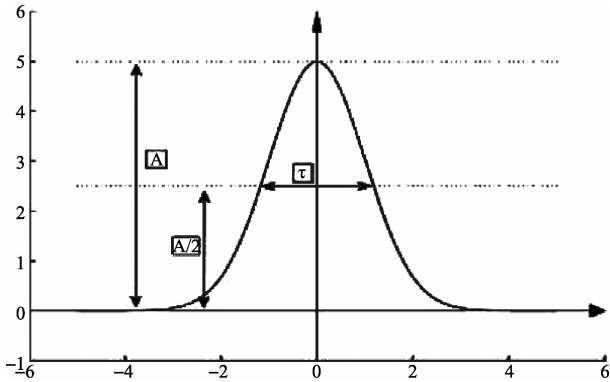


图 1 钟形脉冲波

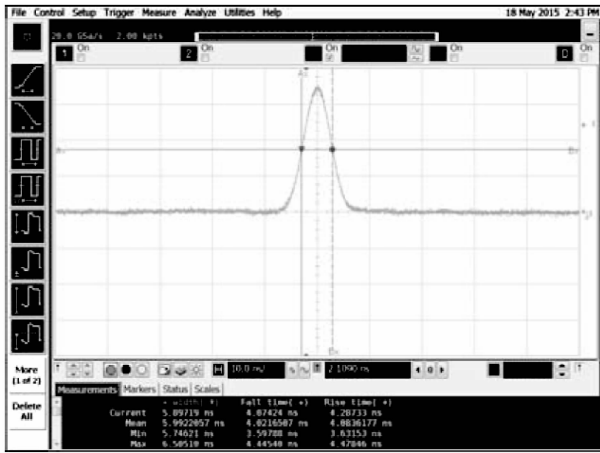


图 2 实际使用激光器发出的激光脉冲信号

由图 2 测量参数 width, Rise time 和 Fall time 可知,实测激光脉冲信号半峰值点脉冲宽度约为 6 ns,即 $t_1 - t_2 = 6$ ns;由于波形对称性好,取 $t_1 \approx 3$ ns, $t_2 \approx -3$ ns,信号带宽可利用以下公式进行计算:

$$f(t_1) = f(t_2) = \frac{A}{2}, e^{-(t/\tau)^2} = \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$-\left(\frac{t_1}{\tau}\right)^2 = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \approx -0.6931, \frac{t_1}{\tau} \approx 0.8326 \quad (4)$$

由于 $t_1 \approx 3$ ns,可得 $\tau \approx 3.6$ ns,进而可得激光脉冲信号带宽 $\Delta f = 0.45/\tau \approx 125$ MHz。

为获得更高的系统信噪比,在保证信号的波形不被过度展宽的情况下,可适当降低信号带宽。综合考虑,放大器带宽取 120 MHz。为进一步减小噪声,加入一级低通滤波电路滤除带外噪声,通过滤波器性能比较,选择过渡带特性最好的椭圆低通滤波器设计实现。

2.2 放大器电路设计

选用 TI 公司推出的高速差分 CFB 运算放大器 THS4509,其具有 1.9 GHz 的增益带宽、1.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的低输入电压噪声、2.2 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的低输入电流噪声。为提高电路放大倍数,将两片 THS4509 顺序级联构成两级放大电路,如图 3 所示。放大器前级单端输入,输入端设置 DC-120 MHz 椭圆低通滤波器(电路如图 4 所示),50 Ω 交流输入,增益设置 20 dB;后级放大差分直流输入,50 Ω 交流输出,增益设置 20 dB,利用 1:1 射频传输线变压器变换得到单端信号。

1) 前级运放参数计算

前级运放是单端信号源驱动,其输入端是非平衡的, R_3 处等效输入阻抗为:

$$R_{IN} = \frac{R_3}{1 - \frac{R_4}{2 \times (R_3 + R_1)}} \quad (5)$$

利用端接电阻 R_1 实现运放输入端与 50 Ω 源阻抗匹配,其计算公式为:

$$R_1 = \frac{50R_{IN}}{R_{IN} - 50} \quad (6)$$

由于增加了端接电阻 R_1 ,导致两反馈环路中的有效增益电阻失去了平衡。为补偿增益电阻的不平衡性,增加校正电阻 R_2 ,其计算公式为:

$$R_2 = \frac{50R_1}{R_1 + 50} \quad (7)$$

对于电流反馈型放大器而言,由于增加电阻 R_1 、 R_2 ,使得两环路中的有效增益电阻 R_3 均有所提高,总闭环增益有所降低,导致实际电路增益会略低于目标值。对于最终的增益调整,可改变微调反馈电阻阻值获得目标增益,电路增益为:

$$\frac{V_{out}}{V_s} = \frac{R_4}{R_3 + R_2} \frac{R_1}{R_5 + R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_1} \frac{R_1}{R_5 + R_1} \quad (8)$$

式中: R_5 为源端阻抗。为保证运放的带宽,电阻 R_1 不易取值过大,通常应小于 500 Ω 。选取 $R_1 = 348 \Omega$,计算可得 $R_3 = 16.5 \Omega$, $R_2 = 42.6 \Omega$, $R_1 = 287 \Omega$ 。

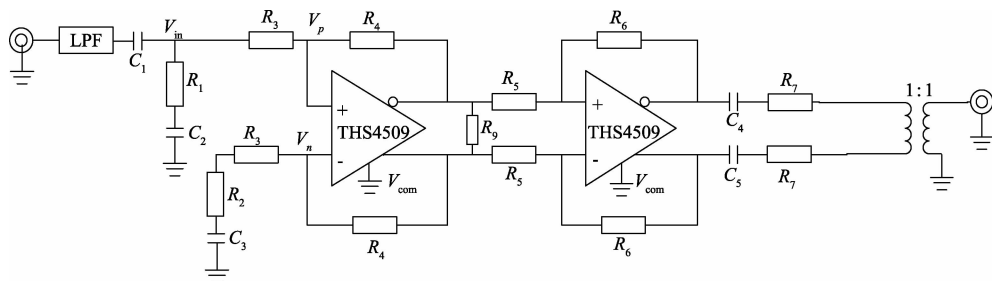


图3 两级级联放大器电路

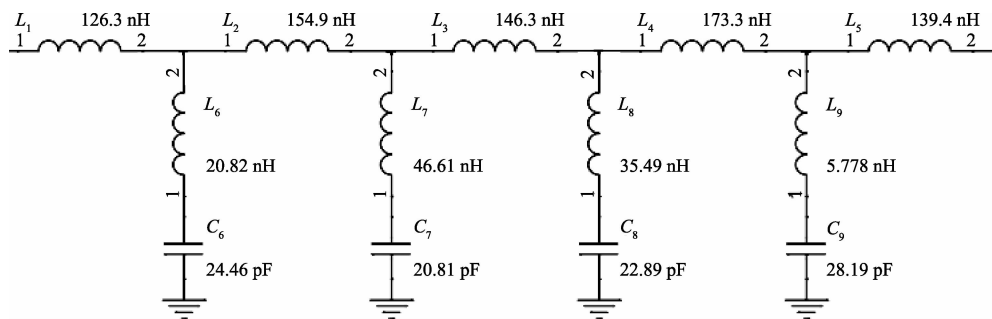


图4 120 MHz 椭圆低通滤波器

2) 后级运放参数计算

后级运放是差分信号源驱动,其输入是平衡的,其电路增益为:

$$A = \frac{R_6}{R_5} \tag{9}$$

利用端接电阻 R_9 实现运放输入端与源阻抗匹配,采用 100Ω 阻抗匹配,可得电阻 R_9 计算公式为:

$$R_9 = \frac{100 \times 2R_5}{2R_5 - 100} \tag{10}$$

选取电阻 $R_6 = 348 \Omega$,电阻 $R_5 = 34.8 \Omega$,由于 $2R_5 < 100$,

可取消端接电阻 R_9 。考虑输出阻抗 50Ω ,取电阻 $R_7 = 25 \Omega$ 。

通过比较各种滤波器性能,采用过渡带特性最好的椭圆低通滤波器实现 120 MHz 低通滤波器,其电路原理如图4所示。

3 仿真分析

利用 Pspice 仿真软件对设计的放大器进行交流扫描分析,考虑到阻抗匹配,前端信号源内阻为 50Ω ,后端接 50Ω 负载,可得频率响应曲线如图5所示。

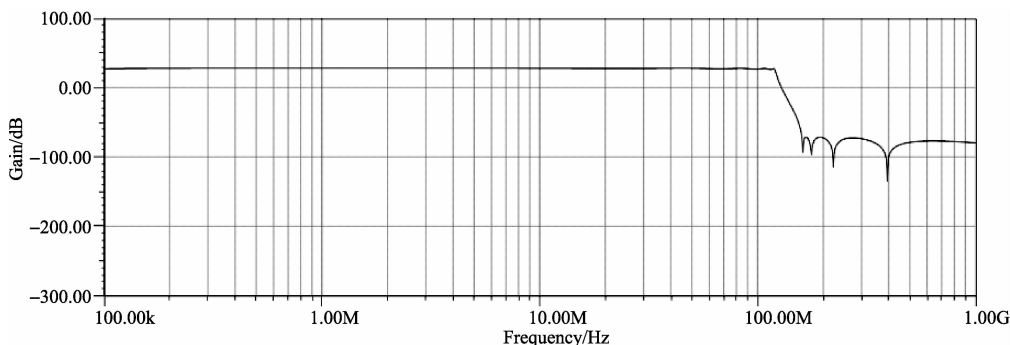


图5 放大器频率响应曲线

由图5可知,宽带放大器放大倍数为 28 dB , -3 dB 带宽约为 120 MHz 。考虑放大器输入阻抗 50Ω ,净输入信号为信号源输出信号的一半。输出阻抗 50Ω ,实际输出为 50Ω 负载上的电压的1倍,可见放大器净放大倍数应该为 $28 + 12 = 40 \text{ dB}$ 。从仿真结果可以看出,设计的放大器放大

倍数和带宽均与设计值相符。

4 实验验证

为进一步验证放大器的性能,进行了电路板 PCB 布线、制板及焊接调试,并搭建了测试验证平台,包括:激光器光学平台和 PD 模块。采用 KEOPSSYS 公司生产的激光

器,最大激光功率 500 mW,返回光通过 PD 传感器和跨阻放大,转换成电压信号后输入放大器。

1) 放大器带宽及放大倍数测试

采用安捷伦公司 E5061B 网络分析仪作为测试设备,放大器频率响应曲线如图 6 所示,放大器带宽约 120 MHz,宽带放大器最大放大倍数 34 dB(10 MHz 以内),通频带内平均放大倍数 30 dB(120 MHz 以内)。考虑网络分析仪输入端 50 欧阻抗,放大器实际放大倍数为 $34+6=40$ dB。

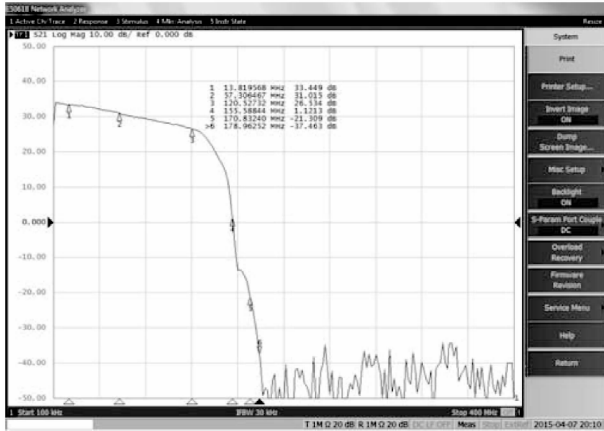


图 6 放大器频率响应测试结果

2) 噪声测试

对放大器进行静态噪声测试,测试结果如图 7 所示,可见,无信号输入时,放大器噪声约为 9 mV(pp),无明显干扰信号,能满足微弱激光信号检测需要。

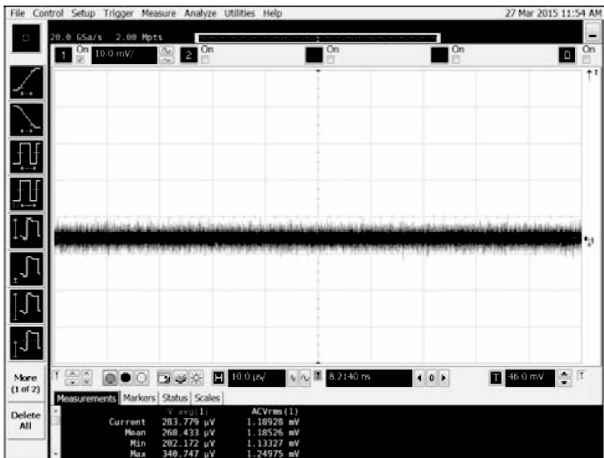


图 7 放大器静态噪声测试结果

3) 激光脉冲信号实际测试

图 8 为激光回波小信号放大后波形,示波器设置为 50 Ω 交流耦合输入,通道 1 为激光光电转换输出信号波形,也即放大器输入波形,通道 2 为经宽带放大器放大后输出信号波形,可得信号放大倍数约 28.23 dB,由于输入

及输出端 50 Ω 阻抗匹配带来的信号 12 dB 衰减,所以总放大倍数约为 40.23 dB,与设计值相符。

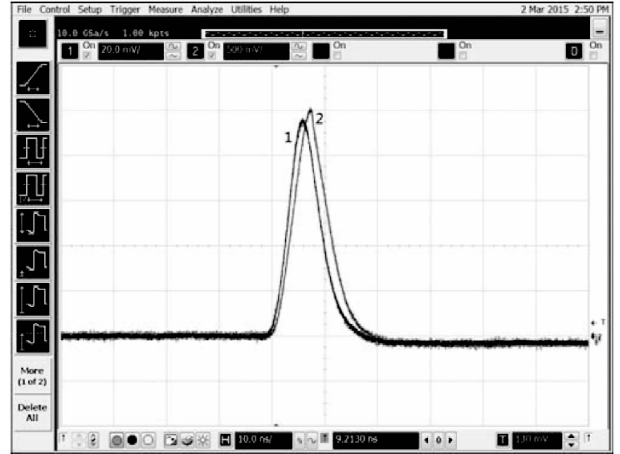


图 8 激光回波放大波形

表 1 为反射率为 0.8 时,利用激光器发出脉冲测试不同距离时宽带放大器的输入和输出脉冲信号的幅度,由表 1 可以看出,采用该宽带放大器对激光回波信号进行放大,目标距离 450 m 时,反射回波经放大器放大,仍能输出 20 mV 的脉冲,可以满足后续 A/D 波形采集的需要,由此可知,测距量程可达 450 m。

表 1 反射率为 0.8 时不同距离放大器输出电压

距离/m	放大器输入/mV	放大器输出/mV
200	3.963	103.075
250	2.453	66.368
300	1.668	43.360
350	1.281	33.732
400	0.972	25.538
450	0.783	20.625

5 结 论

激光回波小信号放大是激光测距的关键技术之一,由于放大器的带宽、放大倍数和噪声之间存在互相制约的关系,因此宽带低噪声放大器的设计具有一定的难度。针对激光回波小信号的特点,选用低噪声宽带 CFB 运算放大器、采用二级级联放大电路结构,并利用椭圆低通滤波器滤除带外噪声,设计了一款低噪声宽带放大器。经 PSpice 仿真分析和实验验证,该放大器指标:放大倍数 40 dB、带宽 120 MHz、系统噪声小于 10 mV(pp),实际测距量程可达 450 m。能对各种反射率条件下不同目标物体反射回来的微弱激光小信号进行有效放大,满足激光测距机长距离和高精度测距的实际需求,为远距离激光测距及三维激光扫描仪的设计奠定了坚实的基础。

(下转第 148 页)