

PSD 测距电路降噪方法

刘媛¹, 赵美蓉¹, 宋乐¹, 王力强²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津职业技术师范大学工程实训中心, 天津 300222)

摘要:针对激光三角法测距技术使用的位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)转换电路,在阐述测量电路原理的基础上,建立了位移转换电路的噪声模型,对各环节进行了敏感性分析,对不同性能参数元器件交叉组合形成的电路进行了多方案计算,得出了元器件性能参数对电路噪声的影响规律,并进行了部分实验验证。结果表明:本研究为实际测量电路设计时应采用的降噪措施提供了参考依据,可望有效地提高整个测量系统的分辨率。

关键词:测控仪器;电路降噪;电路分析;位置敏感探测器(PSD);测距技术

中图分类号:TN702 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.014

Noise reduction method for PSD in the range-finding circuit

LIU Yuan¹, ZHAO Mei-rong¹, SONG Le¹, WANG Li-qiang²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Engineering Training Center, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Aiming at PSD conversion circuit in laser triangulation range-finding, the noise model of displacement conversion circuit is established. The sensitivity of various components is analyzed and the multi-program is computed for the circuits formed by the cross-combination of the components with different performance parameters. The influence of component's performance on the circuit noise is analyzed. Experiments are carried out. The results show that the study provides a valuable reference for the noise reduction method used in the practical measurement circuit design. It can be used to improve the resolution of the range-finding system effectively.

Key words: measurement and control instrument; circuit noise reduction; circuit analysis; position sensitive detector (PSD); distance measurement technique

1 引言

在家用电器、汽车及模型模具等行业中,对于自由曲面的加工要求越来越高。故而高精度、快速、高自动化的在线非接触测量方法随之日益发展^[1]。激光三角法^[2]测距技术就是一种广泛使用的非接触测量技术^[3]。其中,位置敏感探测器 PSD(position sensitive detector)因其具有的高灵敏度及分辨力、快速响应及电路配置简单而成为当前比较常用的元器件^[4]。运用激光三角法的基本原理,通过 PSD 电路转换和之后相应的电路处理,可以进行正弦波光强调制式高精度测距。

目前,国内外相关研究一般是针对 PSD 测量电路系统进行整体综合噪声分析。但其中的前级转换

电路噪声^[5]是整个系统噪声的源头,所以如何对其进行定量分析和控制,具有很大的实用意义。本文拟首先探讨转换电路噪声的理论计算方法,然后通过实验加以验证。

2 PSD 测量电路

PSD 是基于大面积 PN 结的横向光电效应器件,它对入射光斑的位置很敏感^[6-8]。一般 PSD 测量电路先将电流转换为电压信号,然后再对电压信

基金项目:天津市自然科学基金项目(No. 12JCQNJC02700)资助。

作者简介:刘媛(1987-),女,在读硕士研究生,主要从事测试技术与仪表研究。E-mail:les314@sina.com

收稿日期:2011-12-12; **修订日期:**2012-02-29

号进行后续的相关处理,如图 1^[9]所示(AD734 在电路中完成除法运算),其中 R_S 为 PSD 的体电阻。

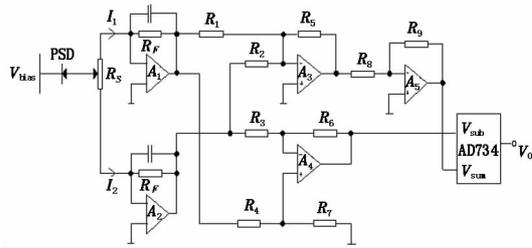


图 1 PSD 测量电路

Fig. 1 measurement circuit of PSD

3 转换电路的噪声分析

3.1 噪声模型

在上述转换电路中,运放电路及 PSD 均产生噪声,应加以分别分析。

3.1.1 运算放大器电路噪声

运放电路主要由电阻、电容及运算放大器组成。

电阻产生的噪声主要为电阻热噪声(也称 Johnson 噪声),其噪声模型等效为电压噪声源与理想电阻相串联,计算公式如下所示^[10]:

$$V_{nR} = \sqrt{4kBTR} \quad (1)$$

式中, k 为 Boltzmann 常数 (1.38×10^{-23} J/K); T 为热力学温度(K); B 为带宽(Hz); R 为电阻(Ω)。

为了计算方便,计算结果以噪声密度表达,其定义为每平方根带宽的噪声(电压或电流),如电压噪声单位为 $nV/(Hz)^{1/2}$ 。

电容对噪声的影响是以阻抗网络的思路来计算的,由于电容与相邻电阻 R_2 相并联,在现阶段可以暂作如下分析:设 Z 为 R_2 与 C 的等效阻抗, $V_{N_{R_2}}$ 为 R_2 的噪声电压, E 为 Z 合成噪声电压,计算公式如下所示^[11]:

$$Z = R_2 // \frac{1}{2\pi f C j} = \frac{R_2}{1 + 2\pi f C R_2 j} \quad (2)$$

$$E^2 = \frac{V_{N_{R_2}}^2}{1 + (2\pi f C R_2)^2} \quad (3)$$

由于并联了电容 C ,使 E 的值相对于 $V_{N_{R_2}}$ 要小,即减小了噪声。同时,在其他条件不变的情况下, C 的值越大,噪声电压越小。因此,电容对噪声的贡献是有影响的。由于本系统使用的频率 f 为低频(kHz 级),电容 C 为小电容(pF 级),所以 $2\pi f C j$ 很小,式(2)近似等于 R_2 。

运算放大器主要由电阻和晶体管构成,必然含

有热噪声、散粒噪声、闪烁噪声、爆裂噪声及雪崩噪声等噪声源。后两种噪声源由于制造工艺的不断改进而可以忽略。其噪声模型等效为电压噪声源 (V_N) 与理想运放的同相输入端相串联,以及电流噪声源 (I_{N+}, I_{N-}) 与理想运放的反相输入端相串联。

综合以上,图 2 给出了运放电路的噪声模型^[11]。各个噪声源之间互不相关,其相对于输出噪声电压的关系为平方和的形式。近似的输出噪声电压为^[12]:

$$V_{no}^2 = (NG \cdot V_N)^2 + 4kTR_3 \cdot (NG)^2 + 4kTR_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + I_{N+}^2 R_3^2 (NG)^2 + I_{N-}^2 (R_1 // R_2)^2 + 4kTR_2 \quad (4)$$

式中, $NG = R_2/R_1$ 为同相端到输出端的电压增益。

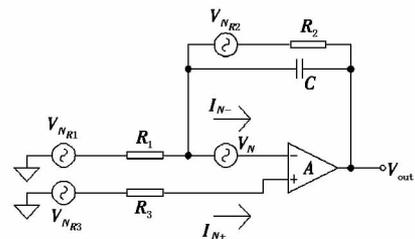


图 2 运算放大器噪声模型

Fig. 2 noise model of operational amplifier

3.1.2 PSD 的噪声

光电流和暗电流流过 PSD 产生散粒噪声,光电流与暗电流之和的平方根与散粒噪声成正比。在一般情况下,即不存在强背景光时,暗电流在实验中远小于光电流,其上限也只有 20 nA,所以产生的噪声非常小,可以忽略不计。而光电流的变化范围则比较大,当其较小时,其噪声较小,可以忽略不计。而输入电流信号变大时,即光电流(入射光斑强度)变大,散粒噪声也随着增加。虽如此,但它的增加幅度远远小于输入电流信号的增加幅度,信噪比反而是增大的,所以也可以忽略,也就是说总噪声的计算中可以忽略散粒噪声部分。PSD 的结电容及体电阻产生的噪声与上文提及的情况相似。

3.1.3 转换电路总噪声

PSD 电流电压转换电路的噪声模型如图 3 所示。PSD 的体电阻 R_S 对应的热噪声为 V_{nRS} 。反馈电阻均为 R_F ,对应的热噪声为 V_{nRF} 。所以第一路的输出端噪声电压为^[10]:

$$V_{no1}^2 = \left(\frac{R_F}{R_S} \cdot V_{nRS}\right)^2 + (I_{n1} \cdot R_F)^2 + V_{nRF}^2 + \left[\left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right) V_{n1}\right]^2 + \left(\frac{R_F}{R_S} \cdot V_{n2}\right)^2 \quad (5)$$

由于电路对称,故有:

$$V_{no2} = V_{no1} \quad (6)$$

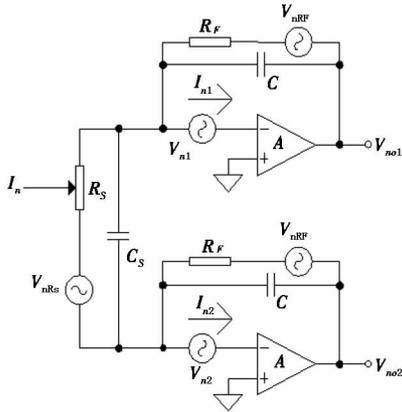


图 3 电流电压转换电路噪声模型

Fig. 3 noise model of current-voltage conversion circuit

将输出的电压噪声换算为输入端电流噪声,是因为 PSD 的输出信号是电流信号,表达式如下:

$$I_n^2 = \left(\frac{V_{nRS}}{R_S}\right)^2 + I_{n1}^2 + \left(\frac{V_{nRF}}{R_F}\right)^2 + \left[\left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_F}\right)V_{n1}\right]^2 + \left(\frac{V_{n2}}{R_S}\right)^2 \quad (7)$$

3.2 噪声分析与抑制方法

由式(5)可见,当 PSD 输出电流相同时,系统的信噪比与 PSD 体电阻大致成反比,所以推荐选用 PSD 体电阻较大的器件。在选择放大器时,应选用输入阻抗大的场效应管型运算放大器。尤其是 JFET(结型场效应管)更具有低噪声的特点,故宜作为首选。

由于 PSD 测量电路的后续部分需以电压差除以电压和来求得输出电压值,分子(电压差)对输出的电压信号发挥更大作用。例如在图 3 中,PSD 体电阻对应的噪声虽然独立作用于两路输出噪声,但由于它是同时作用于两路输出噪声,故 V_{nRS} 在两路信号做相减运算时将产生非常小的噪声。

为了匹配运放噪声,将噪声源按其影响输出噪声的影响标出正负号。 V_{nRS}, I_{n1}, V_{n2} 相对输出为反相放大,为负号; V_{n1} 相对输出为同相放大,为正号。

$$V_{no1}^2 = \left(-\frac{R_F}{R_S} \cdot V_{nRS}\right)^2 + (-I_{n1} \cdot R_F)^2 + V_{nRF}^2 + \left[\left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right)V_{n1}\right]^2 + \left(-\frac{R_F}{R_S} \cdot V_{n2}\right)^2 \quad (8)$$

其等效到输入端的电流噪声表达式为:

$$I_n^2 = \left(-\frac{V_{nRS}}{R_S}\right)^2 + (-I_{n1})^2 + \left(\frac{V_{nRF}}{R_F}\right)^2 + \left[\left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_F}\right)V_{n1}\right]^2 + \left(-\frac{V_{n2}}{R_S}\right)^2 \quad (9)$$

下面是一个具体的算例:

其中使用了 TI 公司型号为 LF412 的运算放大器 ($V_{n1} = V_{n2} = 18 \text{ nV}/(\text{Hz})^{1/2}, I_{n1} = I_{n2} = 0.01 \text{ pA}/(\text{Hz})^{1/2}$),另外使用了型号为 S3931 的 PSD ($R_S = 50 \text{ k}\Omega$)。式中,综合考虑热噪声及信号增益取 $R_F = 510 \text{ k}\Omega$,按常温(25 °C)下 1 Hz 带宽、1 kΩ 电阻会产生 4 nV 的热噪声,如此按式(9)计算的等效输入电流噪声为:

$$I_n^2 = \left\{ \left(\frac{4}{\sqrt{50}}\right)^2 + (0.01)^2 + \left(\frac{4}{\sqrt{510}}\right)^2 + \left[\left(\frac{1}{50} + \frac{1}{510}\right) \times 18\right]^2 + \left(\frac{18}{50}\right)^2 \right\} (\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2 = \{ 0.566^2 + 0.01^2 + 0.177^2 + 0.395^2 + 0.36^2 \} (\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2 = 0.637 (\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$$

$$I_n = 0.80 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$\text{由 } I_{n\text{dB}} = 20 \lg I_n$$

$$\text{得 } I_{n\text{dB}} = -1.96 \text{ dB}$$

从式(9)可以看出,对于运算放大器,在控制电流噪声的基础上,通过选择电压噪声密度小的运算放大器可以有效地减少整体电路的噪声。同时也证明 PSD 体电阻的热噪声在 PSD 转换电路的总噪声占有很大比重。

虽然 JEFT 型双运算放大器(比如 Liner 公司的 LT1113 型)相对于单运算放大器可以更好地进行噪声匹配,但效果并不十分明显。同时,由式(9)及上述计算可以看出,相对于输入电流噪声密度,JEFT 型运算放大器的输入电压噪声密度占整体噪声的比重更大。

4 算例

在此选择了两组不同型号的 PSD 和运算放大器进行交叉配合计算分析。

PSD 选用的是滨松光子学株式会社几种常见型号的产品,其性能参数参如表 1 所示。

表 1 PSD 的性能参数

Tab. 1 performance parameters of different PSD

指标(Typ.) 型号	响应范 围/nm	体电阻 $R_S/\text{k}\Omega$	暗电流 Max./nA	结电容 C_S/pF
S3270	700 ~ 1100	15	20	100
S3931	320 ~ 1100	50	10	40
S4584-06	320 ~ 1100	140	1	15
S5629-02	760 ~ 1100	300	2	60
S3274-05	760 ~ 1100	400	1	15

JFET 运算放大器选用的是 Analog Devices 公司几种常见型号的产品,其性能参数参如表 2 所示。

表 2 运算放大器的性能参数表

Tab.2 performance parameters of several Op Amps

型号	指标(Typ.)	增益带宽/ MHz	电流噪声密度/ pA/(Hz) ^{1/2}	电压噪声密度/ nV/(Hz) ^{1/2}
AD8620B		25	0.005	6
PM157A		20	0.01	12
OP-15		5.4	0.01	15
ADA4000-1		5	0.01	16
AD8625		5	0.0004	17.5
PM155A		2.5	0.01	20
AD8642		3	0.0005	28.5

模拟电路原始噪声的计算是在无输入信号的常温下(25℃)进行的。各种组合的等效输入电流噪声计算结果如图 4 所示。

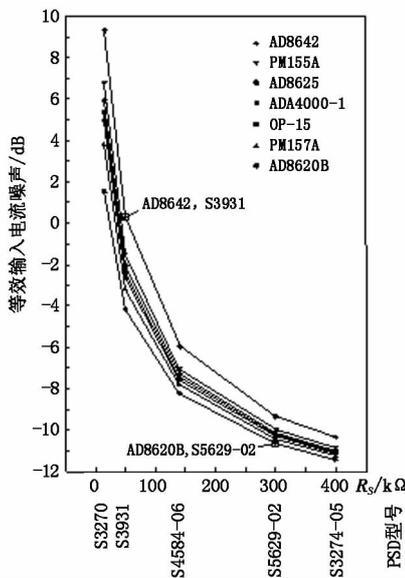


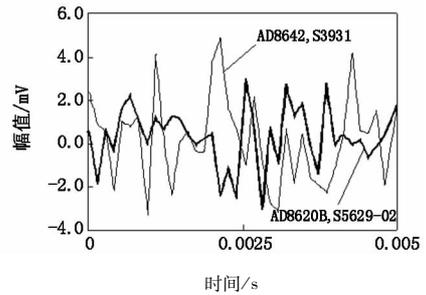
图 4 转换电路等效噪声模拟结果

Fig.4 equivalent current noises simulation results for conversion circuit

5 转换电路实测试验

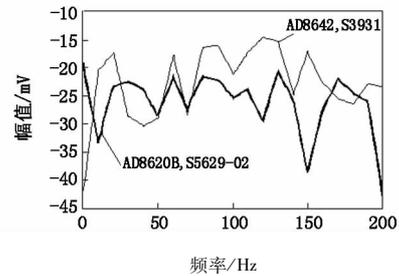
为了检验上述计算的可靠性,选取其中的二种 PSD-运放组合:AD8620B 运算放大器-S5629-02 PSD 与 AD8642 运算放大器-S3931PSD(如图 4 中所标示的)组成电路进行了抽样实测试验。

图 5 为转换电路最终输出的噪声波形及相应的频谱。实验结果表明其与计算结果趋势是一致的,即使用体电阻较大的 PSD 及噪声电压小的运算放大器的前者比后者的噪声要减小很多。



(a) 转换电路最终输出的噪声波形比较

(a) comparison of the wave of conversion circuit noise output



(b) 最终输出的噪声频谱比较

(b) comparison of the frequency spectrum output

图 5 转换电路最终输出的噪声波形及相应的频谱

Fig.5 the waves of conversion circuit noise output and their frequency spectrum

6 结论

本文给出了 PSD 电流电压转换电路的噪声模型,对 PSD 电流电压转换电路做了定量分析,并进行了抽样试验。由电路元件特性、数学模型计算和试验的结果可以分析得到以下结论:

- (1) PSD 的体电阻越大,噪声越小;
- (2) 随着 PSD 体电阻的减小,噪声呈高因次趋势增大;
- (3) 当 PSD 体电阻较大时,不同运放相差不多,当 PSD 体电阻较小时,不同运放相差很多;
- (4) 为了抑制电路噪声、提高系统信噪比,应尽量选用体电阻较大的 PSD 作为光电传感器;
- (5) 基于同样目的,应选用运算放大器的电压噪声密度尽可能小的 JFET 型运算放大器芯片;
- (6) 对于运算放大器,因输入电压噪声密度远大于电流噪声密度,所以在组成电路时,应着重考虑选择电压噪声低的运算放大器。

本研究期待上述结论能有效地降低电压噪声,从而为从源头上降低转换电路的整体噪声提供一些参考,并为实用的电路设计提供一定的依据。

参考文献:

[1] Wang Kai, Xia Yong, Gu Gongyao, et al. Development of noncontact measurement system for mechanic testing of

- car body materials[J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(11):1006-1008,1012. (in Chinese)
- 汪凯,夏勇,顾功尧,等.用于车身材料力学试验的非接触测量系统开发[J]. *汽车工程*, 2008, 30(11):1006-1008,1012.
- [2] Leo H J F Beckmann, Gysbert L Oomea. Measuring system employing a measuring method based on the triangulation principle for the non-contact measurement of a distance from the surface of a contoured object to reference level [P]. American patent, No. 4, 701, 049, 1987-10-20.
- [3] Li Qi, Hou Xiaoning, Song Nianlong. A new design of optical path with linear amplification used in laser triangulation detection system[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(6):803-806. (in Chinese)
- 李琦,侯晓宁,宋念龙.一种具有线性光学放大的激光三角法检测系统光路设计[J]. *光学技术*, 2010, 36(6):803-806.
- [4] Sun Xiankui, Qin Lan, Li Qing. Study on detecting multiple light beams synchronously based on the method of PSD amplitude measure[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(2):446-449. (in Chinese)
- 孙先逵,秦岚,李青. PSD幅值定位法多光束同步检测技术研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(2):446-449.
- [5] Ron Mancini. *Op Amps for everyone*[M]. 2nd ed. Boston; Newnes, 2003.
- [6] Xiao Fulei, Ge Xinguo, Tao Zhongxiang. Modification of position detecting formulation of PSD under very-short-pulse illumination[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11):1174-1176. (in Chinese)
- 肖福磊,葛兴国,陶忠祥.极短脉冲光照下 PSD 位置测量公式的改进[J]. *激光与红外*, 2009, 39(11):1174-1176.
- [7] Qingsong Lin, Xiaojing Yang, Feng Liu, et al. Study on spatial 3-D nonlinear correction technique for PSD[C]. *IEEE International Conference on Rsete*, 2011: 8565-8567.
- [8] Guo Lifeng, Zhang Guoxiong, Guo Jingbin, et al. Study on spatial 3-D nonlinear correction technique for PSD[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, 18(5):566-570. (in Chinese)
- 郭丽峰,张国雄,郭敬滨,等. PSD空间三维非线性修正技术的研究[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(5):566-570.
- [9] Yang Deliang, Wei Yanding, Zhou Guanxiang, et al. Design of fabric guide line tracker based on position sensitive detector[J]. *Journal of Textile Research*, 2010, 31(6):129-133. (in Chinese)
- 杨德亮,魏燕定,周冠雄,等.基于 PSD 的织物引导线跟踪器设计[J]. *纺织学报*, 2010, 31(6):129-133.
- [10] Henry W Ott. *Noise reduction techniques in electronic systems*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1988.
- [11] Jiang Huanwen, Feng Xisheng. *Noise analysis of amplifying circuit*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987. (in Chinese)
- 蒋焕文,冯锡生.放大电路的噪声分析[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [12] Gao Jing. *Research and design of CMOS integrated operational amplifier*[D]. Tianjin: College of Information Technical Science, Nankai University, 2005. (in Chinese)
- 高静. CMOS 集成运算放大器的研究与设计[D].天津:南开大学信息技术科学学院,2005.