

· 光电子学工程与应用 ·

## 利用三极管对高速大动态光电转换系统降噪分析

罗志祥, 张俊, 柯昌剑, 刘德明

(华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室 武汉 430074)

**【摘要】**在高速大动态光电转换系统中, 高速开关在切换通道时产生的脉冲噪声使高速运放芯片的瞬态响应出现边沿脉冲, 对高速光电转换电路的测量产生不可忽视的干扰。该文理论分析了光电二极管的等效电路中潜在的分流通路, 通过实验分析了三极管射极和集电极间电阻特性与基极电压的关系, 理论阐述采用在切换通道并联三极管利用其泄流原理对高速开关产生的脉冲噪声进行抑制的方案, 并对对比分析加三极管泄流和不加三极管泄流的实验仿真结果, 验证了并联三极管泄流的方案具有明显的降噪效果。

**关键词** 高速光谱探测; 高速开关; 脉冲噪声; 大动态光电转换; 三极管泄流

中图分类号 TN710 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.01.025

## Analysis of Noise Reduction in High-Speed Large Dynamic Photoelectric Conversion System by Triode

LUO Zhi-xiang, ZHANG Jun, KE Chang-jian, and LIU De-ming

(National Engineering Laboratory for next generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074)

**Abstract** In high-speed and large dynamic photo-translating systems, the impulse noises generated by switching channel makes the edge pulses appear at the transient response of high-speed operational amplifiers in high-speed circuits. This paper analyzes the potential shunt circuits in the equivalent circuit of photodiode, experimentally studies the relationships between resistance characteristic and bias voltage of audion emitter and collector, and elaborates a project that controls the impulse noises produced by high-speed switch via aerial drainage theory of parallel connection of audion in switching channels. Finally, the simulation results of aerial drainage with and without an audion are compared. It is shows that the project of aerial drainage with parallel connection of audion can achieve a significant effect in reducing noises.

**Key words** high-speed spectrometer testing; high-speed switch; impulse noise; large dynamic photoelectric; triode discharge

通信系统逐渐采用光纤传输代替传统技术, 光纤通信的进步要求配套的测量技术和测量仪器不断进步。在科研和生产过程中为了探测和采集更高质量的目标光电信号, 对光电探测器的性能和数据采集速率的要求越来越高<sup>[1-2]</sup>。

传统光电探测器的光电转换系统很难在保持高速的同时实现大的动态范围<sup>[3-5]</sup>, 在高速大动态光电转换的实际应用中, 通常采用自动量程切换的设计方案。量程切换的核心思想是利用高速开关切换通道改变反馈阻值的大小, 从而改变运放的放大倍数。然而, 高速开关在切换通道时产生的脉冲噪声对于高速信号是不可忽视的噪声干扰<sup>[6]</sup>。该噪声会使高

速运放进入饱和区, 延迟响应时间, 使光电转换系统速率降低<sup>[6-8]</sup>。

本文选择在切换通道旁并联三极管作为泄流管来有效抑制噪声, 通过分析其中的原理和实验仿真得以验证。

### 1 系统构成

三极管作高速开关泄流管的电路结构如图1所示, 主要由以下6个部分组成:

- 1) 光电二极管;
- 2) 高速运算放大器;
- 3) 反馈电阻;

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-05-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ16048703)

作者简介: 罗志祥(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光通信与光网络方面的研究。

- 4) 滤波电容;
- 5) 高速开关;
- 6) NPN型三极管。

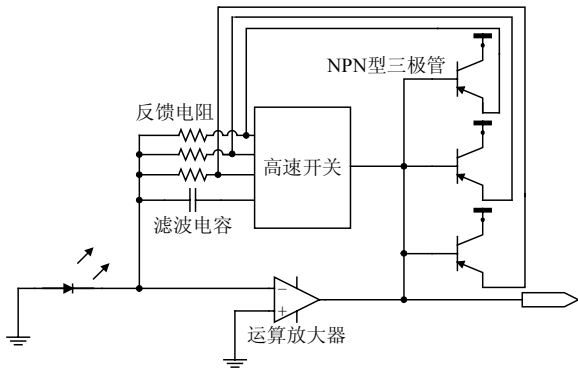


图1 三极管作泄流管的电路结构

## 2 原理分析

### 2.1 光电二极管的特性

光电二极管可等效为一个电流源  $I_D$ 、分流电阻  $R_D$  和一个结电容  $C_D$  并联<sup>[9]</sup>, 如图2所示。

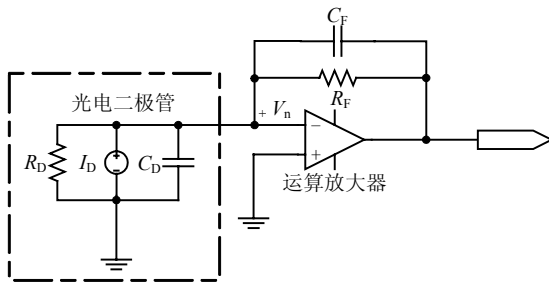


图2 光电二极管等效电路

光电二极管的等效电流源的电流目前有以下3个潜在通路可分流:

- 1) 运放的跨接电阻  $R_F$ ;
- 2) 光电二极管的等效分流电阻  $R_D$ ;
- 3) 运算放大器的内阻  $r_i$ 。

由于  $r_i \gg R_D \gg R_F$ , 3个通道都闭合的情况下, 大部分电流会从跨接电阻  $R_F$  上流走, 流过光电二极管的等效分流电阻  $R_D$  的电流很少。所以光电二极管在  $R_D$  上形成的电压很小, 几乎为零, 作为运算放大器反相输入端的输入电压  $V_n$  不会使运放进入饱和区, 而是工作在线性区<sup>[10]</sup>。

### 2.2 三极管的特性

三极管基极有正向电压时, 射极与基极间形成正向压降, 集电极与基极间形成反向压降, 满足三极管的放大状态要求<sup>[11-12]</sup>。射极到集电极通路的等效电阻可通过实验得出, 其结果如表1所示。由实验

数据可知, 影响三极管射极与集电极间电阻特性主要是基极电压。基极电压达到0.5 V(电阻为  $3.0 \times 10^6 \Omega$ ) 以上, 可视为远小于光电二极管漏电阻  $R_D$ 。

表1 不同基极电压下三极管集电极与射极间电阻特性 (集电极电压  $V_C=12\text{ V}$ , 射极电压  $V_E=0\text{ V}$ )

三极管基极电压 /V	三极管射极电流 /A	集电极与射极间电阻 / $\Omega$
0	$0.016 \times 10^{-9}$	$7.5 \times 10^{11}$
0.1	$0.028 \times 10^{-9}$	$4.3 \times 10^{11}$
0.2	$0.143 \times 10^{-9}$	$8.4 \times 10^{10}$
0.3	$2.400 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^9$
0.4	$0.087 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^8$
0.5	$3.944 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^6$
0.6	$0.184 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^4$
0.7	$6.108 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^3$
0.8	0.037	324
0.9	0.074	162
1.0	0.107	112

### 2.3 三极管的泄流作用

高速开关在工作时, 总有一路处于选通状态, 但是开关切换通道的瞬间, 还是有断开的过程。

开关闭合时, 电路中的电流回路如图3中空心箭头所示, 在运算放大器反相输入端产生接近于0的电压; 开关断开后, 跨接电阻通道断开的电流回路如图3中黑箭头所示。

光电二极管产生的电流  $I_d$  大部分流向光电二极管的等效分流电阻  $R_D$ , 在  $R_D$  上形成的电压很大, 作为运算放大器反相输入端的输入电压  $V_n$ , 使运算放大器进入深度饱和区, 影响信号的响应速率。

小信号的瞬态响应在上升沿和下降沿都会有脉冲。对于低速电路, 由于瞬态响应时间比较长, 脉冲时间只占瞬态响应过程的小部分, 几乎不会影响后续数据采集电路的采样精度。而高速运算放大器转换速率很高, 瞬态响应时间很短暂, 都使瞬态响应出现的边沿脉冲在整个响应过程中不能忽略。加上过载恢复时间的作用, 边沿脉冲占的比例还会更大, 使得高速电路出现脉冲噪声的干扰。

在开关旁并联三极管, 开关断开后, 电路中的电流回路如图4中实心箭头所示。三极管基极电压由运算放大器输出端提供, 发射极正偏, 集电极反偏。三极管集电极到射极通路阻抗远小于光电二极管等效电阻  $R_D$ , 光电探测器产生的大部分电流可以通过三极管射极与集电极的通路流走, 只有很少一部分电流流过  $R_D$ 。运算放大器反相输入端的电压  $V_n$  几乎为零, 运算放大器不会进入饱和区。



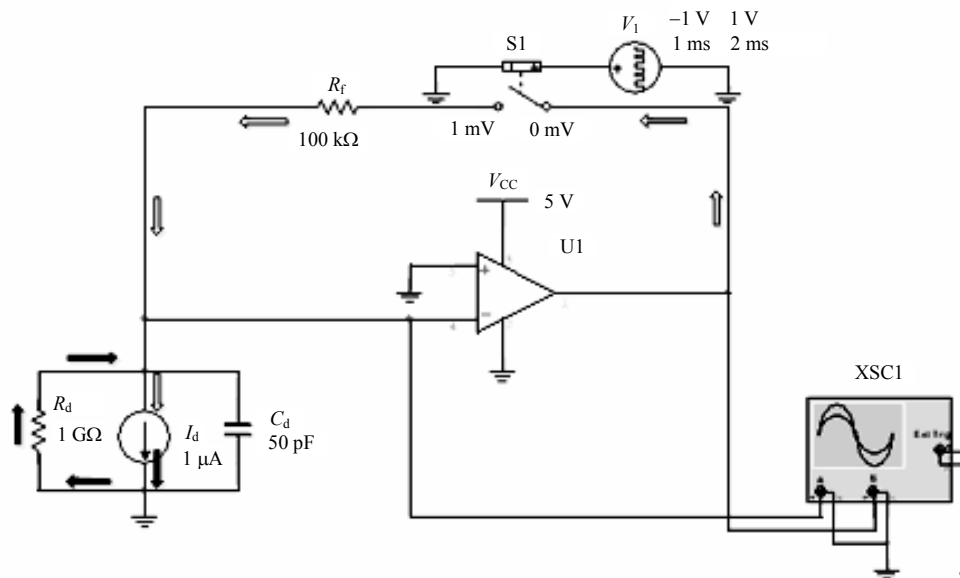


图3 不加三极管的放大电路

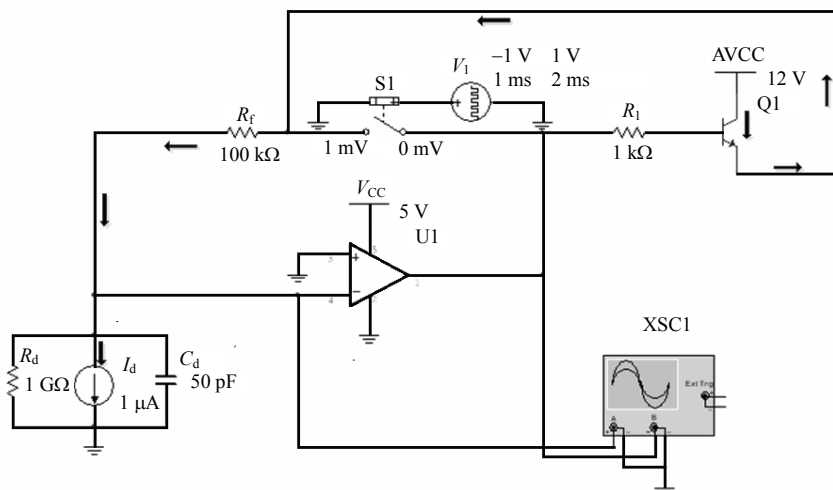


图4 加三极管的放大电路

被选通的三极管基极电压由运算放大器输出端提供，可进入泄流模式；未被选通的三极管基极处于悬空状态，三极管无法导通；高速开关闭合后，三极管基极与发射极接在同一端，三极管无法导通。

综上所述，三极管的泄流作用运用了三极管的电阻特性。开关断开时，三极管相当于通路，将光电二极管的电流导出，使运算放大器输入端电压稳定在很小值；开关闭合后，三极管又相当于开路，不影响电路的输出。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 不加三极管脉冲效果分析

用压控开关模拟高速开关的断开和闭合，给压

控开关加2 ms的方波电压，则开关的断开与闭合的周期为2 ms。输入电压与输出电压仿真结果如图5所示。通道A和通道B分别测量输入和输出电压。由标线T1(粗实线)知，开关闭合时，输入电压为1.654 mV，输出电压为-101.670 mV，运算放大器工作在线性区；由标线T2(粗虚线)可知，开关断开后，输入电压上升到-4.820 V，输出电压立刻跳变到5.000 V，运算放大器进入饱和区。

由运算放大器从饱和区回到线性区的下降沿可观察到抖动，其输出放大后的细节如图6所示。由标线T2-T1可知，开关闭合后，运算放大器输出电压从饱和区值回到有效输值时间大约为42.992 μs。

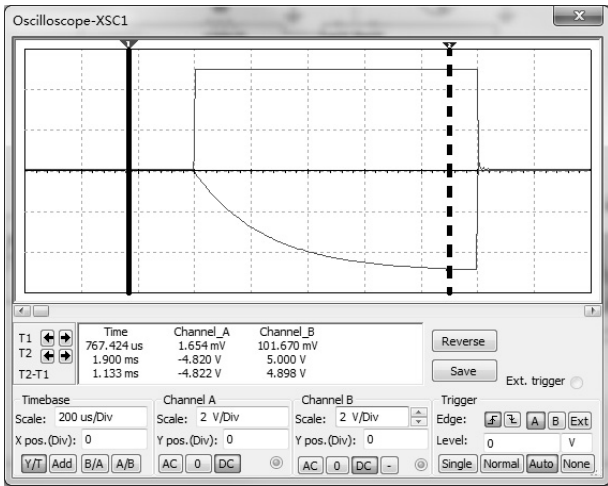


图5 输入电压与输出电压仿真结果(不加三极管)

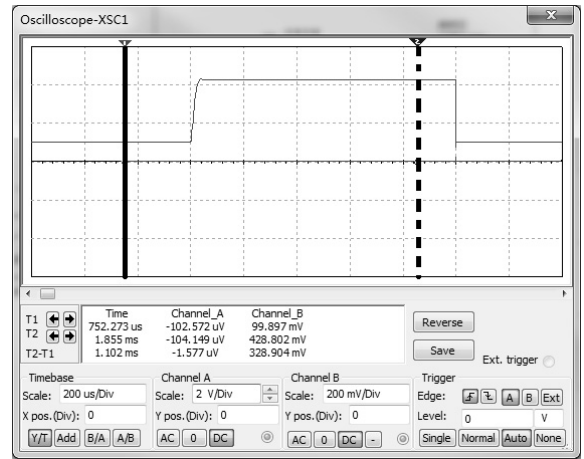


图7 输入电压与输出电压仿真结果(加三极管)

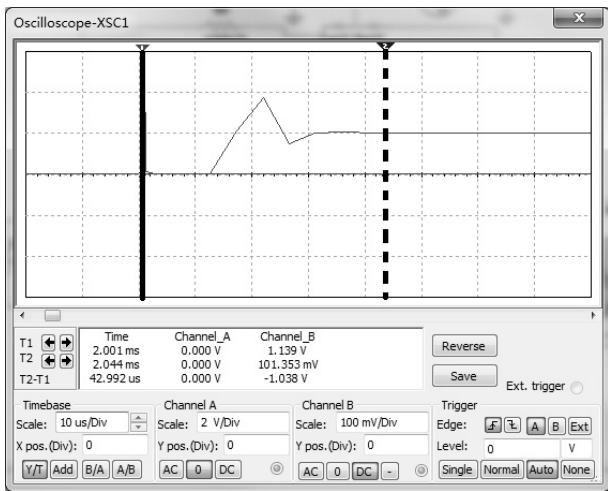


图6 放大器输出端细节(不加三极管)

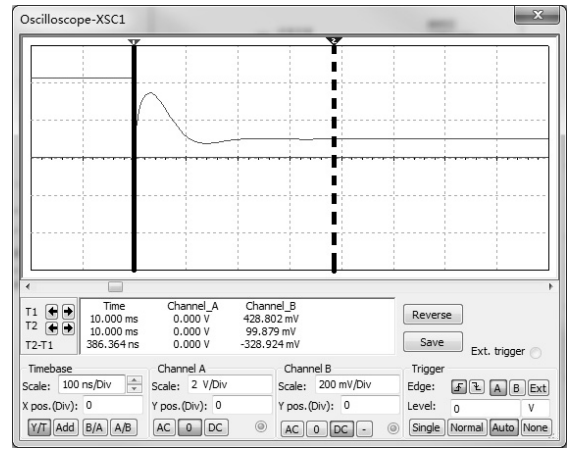


图8 放大器输出端细节(加三极管)

### 3.2 加三极管泄流脉冲效果分析

输出电压与输入电压仿真结果如图7所示。对比图5与图7可知，加三极管后运算放大器很稳定地在线性区。由标线T1可知，开关闭合时，输入电压为 $-102.572 \mu\text{V}$ ，输出电压为 $99.897 \text{ mV}$ ；由标线T2可知，开关断开后，运算放大器输入电压为 $-104.149 \mu\text{V}$ ，输出电压为 $428.802 \text{ mV}$ ，由于三极管  $V_{be}$  的影响使得运放在开关断开后的输出电压大于开关闭合时的输出电压，但远小于饱和电压 $5 \text{ V}$ ，运放稳定在线性区。运算放大器输入电压几乎为零，而且稳定效果很好，只有在开关闭合瞬间有极窄抖动，对其输出影响不大。

在开关闭合瞬间，运算放大器输出端电压细节如图8所示。由标线T1-T2可知，加三极管后运算放大器由于没有进入饱和区，输出下降到有效电压值的时间大约为 $386.364 \text{ ns}$ 。相比图6与图8，可明显发现时间缩短了2个数量级。

## 4 结束语

三极管的泄流作用对于高速开关切换通道产生的脉冲噪声有极好的抑制效果，有效缩短了输出信号下降沿的恢复时间，使信号能够在高速大动态的情况下保持稳定有效的输出。

### 参考文献

- [1] LI Han-shan, GAO Hong-yao, MING Jiang. Research on improve the photoelectric detecting performance of optoelectric detecting targets[J]. Trajectory Journals, 2007, 19(1): 33-36.
- [2] NI Jin-ping, YANG Lei. Method for measuring velocity of warhead fragments based on photoelectric detection[J]. Journal of China Ordnance, 2007, 3(4): 275-280.
- [3] MUSAYEV E. Laser-based large detection area speed measurement methods and systems[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(11): 1049-1054.
- [4] 李秋顺. 光学测量处理脱靶量研究[J]. 光子学报, 1999, 28(3): 255-259.

Li Qiu-shun. Research on miss distance in optical measurement processing[J]. Acta Photonica Sinica, 1999,

- 28(3): 255-259.
- [5] LI Han-shan, LI Zhi-yong, GAO Jun-chai. Research object photoelectric characteristic and fire coordinate distributing probability in across screen system[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2012, 7(2): 199-203.
- [6] 王诣, 王选择, 翟中生, 等. 新型光电检测电路的研究与设计[J]. 光电子技术, 2012, 32(2): 131-136.  
WANG Yi, WANG Xuan-ze, ZHAI Zhong-sheng, et al. Study and design of the new photoelectric detective circuit[J]. Optoelectronic Technology, 2012, 32(2): 131-136.
- [7] 宋涛, 张斌, 罗倩倩. 光电转换电路的设计与优化[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 46-48.  
SONG Tao, ZHANG Bin, LUO Qian-qian. Photoelectric conversion circuit design and optimization[J]. Electro-Optical Technology Application, 2010, 25(6): 46-48.
- [8] 王立刚, 张殿元. 低噪声光电检测电路的研究与设计[J]. 电测与仪表, 2007, 44(8): 63-66.  
WANG Li-gang, ZHANG Dian-yuan. Research and design of photoelectric detection circuit with low noise[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(8): 63-66.
- [9] 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.  
HU Tao, SI Han-ying. Design and research of pre-amplifier circuit from a photoelectric detector[J]. Electro-Optical Technology Application, 2010, 25(1): 52-55.
- [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]. 集成电路设计与应用, 2011, 36(4): 304-307.  
ZHAN Jian-ming, WEN De-sheng, WANG Hong, et al. Noise analysis of pre-amplifier based on photodiode[J]. IC Design and Application, 2011, 36(4): 304-307.
- [11] 张士文, 爰国华, 张峰. 一种三极管共射放大电路的讨论[J]. 电气电子教学学报, 2012, 34(6): 43-45.  
ZHANG Shi-wen, SHU Guo-hua, ZHANG Feng. Discussion on a common emitter amplifier of bipolar junction transistor[J]. Journal of EEE, 2012, 34(6): 43-45.
- [12] 张爱英. 基于Multisim的三极管放大电路仿真分析[J]. 现代电子技术, 2013, 36(4): 123-126.  
ZHANG Ai-ying. Simulation analysis of transistor amplifying circuit based on Multisim[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(4): 123-126.

编辑 漆蓉

(上接第106页)

- [11] ZHANG Yue, CLARK S. A tale of two parsers: Investigating and combining graph-based and transition-based dependency parsing using beam-search[C]// Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP '08). Stroudsburg, USA: Association for Computational Linguistics, 2008: 562-571.
- [12] CARRERAS X. Experiments with a higher-order projective dependency parser[C]// Proceedings of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Prague, The Czech Republic: Association for Computational Linguistics, 2007: 957-961.
- [13] GREEN N. Hybrid combination of constituency and dependency trees into an ensemble dependency parser[C]// Proceedings of the Workshop on Innovative Hybrid Approaches to the Processing of Textual Data. Avignon, France: Association for Computational Linguistics, 2012: 19-26.
- [14] LI Zheng-hua, LIU Ting, CHE Wan-xiang. Exploiting multiple treebanks for parsing with Quasi-synchronous grammars[C]// Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Jeju Island, Korea: Association for Computational Linguistics, 2012: 675-684.
- [15] NIU Zheng-yu, WANG Hai-feng, WU Hua. Exploiting heterogeneous treebanks for parsing[C]// Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Language Processing of the AFNLP. Suntec, France: Association for Computational Linguistics, 2009: 46-54.
- [16] ZHOU Guang-you, ZHAO Jun. Joint inference for heterogeneous dependency parsing[C]// Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Sofia, The Republic of Bulgaria: Association for Computational Linguistics, 2013: 104-109.

编辑 叶芳