

空间瞬态微光探测中对数域压缩探测方案研究

梁义涛¹, 唐垚², 汶德胜², 王宏², 石兴春²

(1 河南工业大学 信息学院, 郑州 450001)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:针对瞬态微光信号动态范围大、低端信号微弱的特点,提出一种新的对数域压缩探测方案. 基于该方案的设计原理分析,选择合适器件,完成电路设计进行实验验证. 实验研究表明,该方案可将 120 dB 的瞬态光信号压缩到 0~5 V 的范围内,在降低了电路复杂性和功耗的同时,可大大缓解后级数据采集单元的设计压力.

关键词:光电探测;对数域压缩;瞬态光信号

中图分类号: V556

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3104-5

0 引言

瞬态光辐射探测器融合了现代光电探测、微弱信号处理和遥感等技术,应用于高空或空间对地探测各种闪电以及由闪电引发的中高大气层闪光(Transient Luminous Events, TLEs)等瞬态光辐射事件,采集目标信号时间-空间-能量的动态信息. 其主要探测性能要求是高灵敏度和宽动态范围,是光电探测技术的一个全新应用技术领域. 目前,瞬态光辐射能量探测器已经成为各种瞬态光辐射事件探测器不可或缺的组件之一.

国际上,该系统的理论和应用技术研究始于 20 世纪 60 年代中期,闪电光辐射首次被 NASA 的 OSO-2 卫星观测到^[1]. 此后,OSO、VELA、DMSP 系列卫星等做了大量的瞬态光辐射探测,但是由于缺少有关云顶光学闪电辐射的时空及光谱特性等详细资料,星载探测器的探测效果一直不尽如人意^[2-4]. 20 世纪 80 年代开始,NASA 利用 U-2 高空飞机近距离探测了大量闪电光电探测资料,为星载探测器的研究提供了所需判据,为采用现代探测技术从空间进行瞬态光探测验证了可行性^[5]. 1997 年,美国发射了 FORTE 卫星. 它搭载了专用的瞬态光辐射探测器—PDD 能量探测仪^[6],专门探测闪电等瞬态光事件的辐射能量变化,探测性能大为改善,探测数据完整. 该探测器的信号调理是利用分段线性的多级压缩方案实现的. 这种方案具有探测准确度较高,探测数据无需反变换处理等优点;但电路设计相对复杂,低端微弱信号容易被噪音所淹没;而且目标信号不可能完全压缩到一个较窄的幅度范围,增加了

后级数据采集单元的设计压力.

经调研,针对实际需要探测的目标信号具有动态范围大(>60 dB)、低端信号微弱($\sim 10^{-4}$ W/m²)的特点,本文给出了一种基于对数域压缩的非线性信号调理方案,应用于瞬态光辐射能量探测器设计. 对数域压缩的非线性探测方案使得输入输出信号成对数关系,对低端微弱信号有较高的增益,而高端信号有压缩作用,多用于瞬时压缩目标信号的动态范围^[7]. 该方案的另一优势在于可大大降低后级采集电路设计压力. 大动态范围信号经过对数域压缩后,使用较低位宽的 ADC 即可实现信号的精确测量.

1 对数转换基本原理

一般,对数放大器的核心电路采用转移二极管结构. 实际的对数放大实现如图 1.

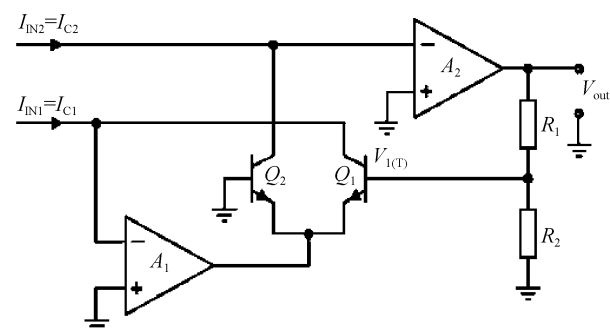


图 1 对数压缩电路原理

Fig. 1 The principle scheme of Logarithmic amplifier

利用性质 $\ln x = 2.303 \lg x$, 并分析电路得到

$$v_o = V_o \lg(i_i / I_{REF})$$

$$\text{式中 } V_o = -2.303 \frac{R_2(T) + R_1}{R_2(T)} V_T.$$

图中电路通过应用一对匹配的 BJT 来消除集电极饱和电流 I_s 的影响(对于匹配 BJT, $I_{s1} \approx I_{s2}$), 并用一个热敏电压分压器来补偿温漂对热电压 V_T (室温下, $V_T \approx 26$ mV) 的影响. 只要选择合适参量

的 PTC(正温敏系数)的热敏电阻,指图中的 $R_2(T)$, 就可以使 V_o 热稳定.

2 方案设计及器件选择

基于对数放大器的基本工作原理的分析,对数域压缩方案设计如图 2. 电源转换单元将系统的 $\pm 12\text{ V}$ 电源转换成 $\pm 5\text{ V}$ 电源为模块各单元供电. PDD 单元、对数 I/V 转换单元和参考电流单元将入射光信号转换成电压信号,经调理电路单元将该电压调理到 $-5\text{ V}\sim+5\text{ V}$ 范围内,0.12 Hz 低通滤波单元提取背景信息;100 KHz 输出的是背景和信号的叠加,同时起到滤除高频干扰的作用. 输出整理单元包括差分输出电路和 RC 退耦电路. 两路滤波后输出信号的差分调理电路相当于对信号进行带通滤波和反相调理.

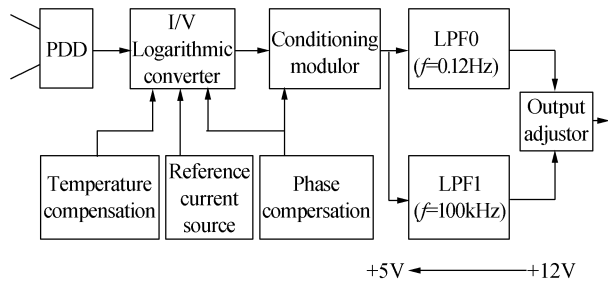


图 2 系统设计基本框图
Fig. 2 The system basic diagram

依据目标探测光谱范围(400~1 100 nm)、峰值

探测波长($\sim 900\text{ nm}$)和探测光强范围($10^{-4}\sim 1\text{ W/m}^2$)等参量,光电探测器选用 S2386-8K.

宽动态对数域压缩单元选用 AD822 和 MAT02 实现. AD822 是单/双电源、低功耗、精密场效应输入的运算放大器. 正常工作时,输入偏置电流极小,在皮安级. 这一点非常适合应用于电流输入的对数放大器. 匹配晶体管选用单片式低噪音匹配晶体管器件 MAT02. MAT02 主要应用于低噪音系统设计. 集电极电流在 $0.1\ \mu\text{A}\sim 10\text{ mA}$ 范围时,电特性逼近理想的晶体管. 两个晶体管具有优秀的对数匹配特性,使其非常适合用来设计对数放大器.

参考源由 AD584 和筛选出的 $50\text{ M}\Omega$ (稳定性 $\sim 50\text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 高精度电阻构成. AD584 是一种精密基准电源,实际中 AD584 内部的缓冲运放带宽根据需要进行调整,以实现输出噪音的滤波. 本设计输出范围为 $2.5\text{ V}\pm 7.5\text{ mV}$. 参考源设计如图 3.

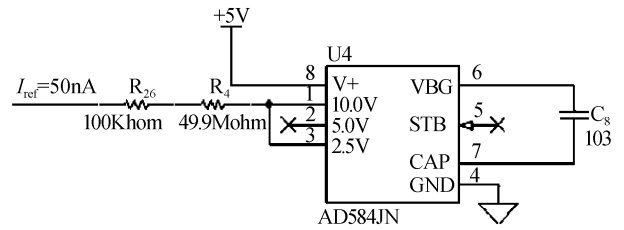


图 3 参考源设计原理
Fig. 3 The scheme of reference current source

最终实现对数 I/V 转换电路如图 4.

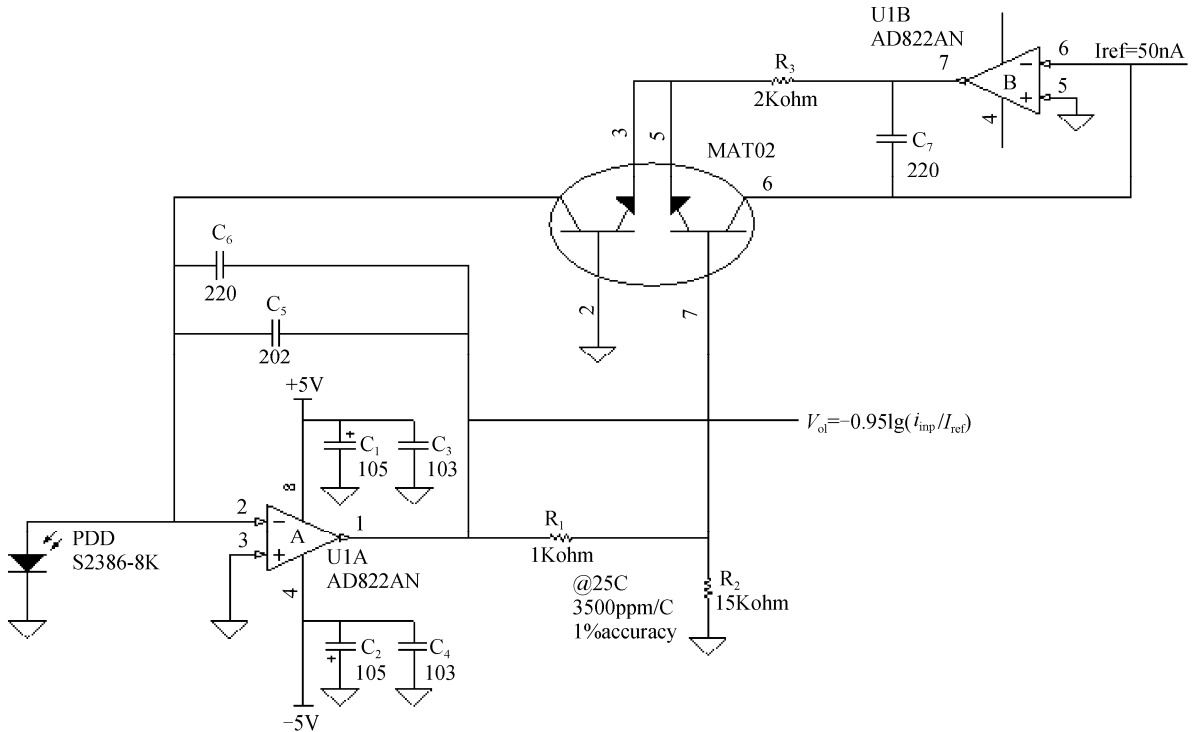


图 4 对数 I/V 转换电路原理
Fig. 4 The scheme of logarithmic I/V converter

AD822 U1A 与 MAT02 实现 S2386-8K 光生电流对数域压缩核心电路, AD822 U1B 和 AD584 为 MAT02 提供 ~ 50 nA 的参考电流, R_1 、 R_2 和 R_{25} 将输出的对数电压信号调理成常用对数形式, 并对晶体管的热电压当量 V_T 进行温度补偿, 保证输出的对数域线性. 由于反馈回路存在有源增益单元, 所以应用转移二极管进行对数 I/V 转换电路中有发生振荡的趋势, 这一点是很糟糕的. 出于电路稳定性的考虑:

1) 选用 R_3 降低反馈增益, 以提高对数放大反馈通路的闭环增益;

2) 选用 C_5 来补偿 U1A 杂散电容引入的相位滞后问题. 选用 C_6 来对反馈电容参量进行微调;

3) C_7 用来补偿 U1B 杂散电容引入的相位滞后问题.

热敏电压分压器的正温敏系数热敏电阻选用 PT094-35(图 4 中的 R_2). 其温度系数 $3\ 500$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$; 25°C 时, 标称阻值为 $1\ \text{k}\Omega$, 允差 $\pm 0.05\%$, 稳定度 $\pm 0.01\%$ /year. PCB 设计时, 还要考虑将热敏电阻贴装于 MAT02 近旁, 尽可能保证它们工作环境温度的一致性; R_1 选用高稳定度精密电阻 HVS-1, 阻值 $15\ \text{k}\Omega$, 允差仅 $\pm 0.005\%$, 稳定度达 $\pm 0.001\%$ /year, 温度系数最小仅 ± 1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.

对理想的 PTC 补偿方案进行建模仿真, 并与实际器件的补偿效果进行对比, 结果如图 5.

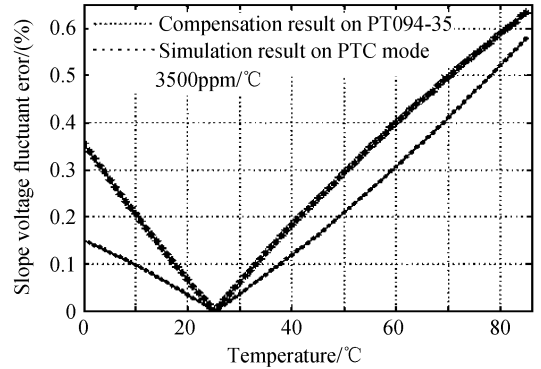


图 5 PT094-35 温度补偿效果

Fig. 5 The temperature compensation result using PT094-35

通过比较可知, PT094-35 在 $0\sim 85^{\circ}\text{C}$ 最大补偿误差为 $\sim 0.6\%$, 仅比理想线性补偿高 $\sim 0.05\%$. 其在全工作范围内, 补偿效果与理想器件补偿仿真基本吻合, 满足系统工作要求.

由本文电路分析知

$$V_{o1} = -0.9467 \lg(i_{\text{imp}}/I_{\text{ref}})$$

式中, 输入参考电流 $I_{\text{ref}} = 50$ nA. -0.9467 为对数转换的斜率电压; i_{imp} 为输入的光生电流. 总结目标信号各特征点光辐照度, 依次估算 V_{o1} 输出范围在 $2.5\ \text{V}$ 到 $-4.1\ \text{V}$, 综合信号探测动态范围要求, AD822 均采用 $\pm 5\ \text{V}$ 供电即能满足要求.

AD822 U3A 构成信号差分电路, 实现背景扣除和信号反向功能. 调理电路原理图如图 6.

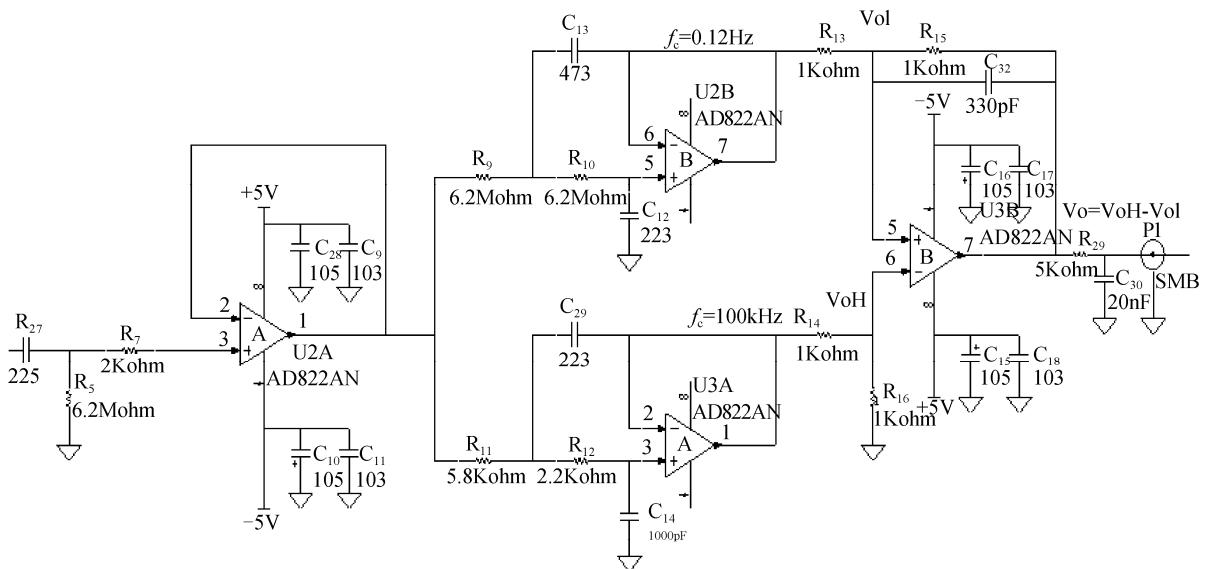


图 6 调理电路原理

Fig. 6 The scheme of conditioning circuit

经过对模拟信号源的采样调试, 最终确定两路低通滤波器的截止频率为 $0.12\ \text{Hz}$ 和 $100\ \text{kHz}$.

3 测试与分析

模拟信号源的标定使用 UDT 的 11A 型光功

率/辐射度计. 标定出各等级光强的光路和设备环境状态, 并对设计模块进行测试. 对数调理板测试时, 安装在模样电控箱内配合光机结构进行测试. 模拟源使用户提供的测试数据仿真出目标光信号, 信号波形持续 $1\ 000\ \text{ms}$.

测试结果如图 7. 图 7(a)为低端信号(最大峰值 $2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$)探测器波形. 测试示波器设置为:测量带宽 20 MHz, 时间 1 s/div, 幅度 500 mV/div, 直流耦合. 高端信号(最大峰值)对数波形参见图 7 (b). 示波器幅度设定为 2 V/div, 时间为 200 ms/div, 其他设置同低端信号测试状态.

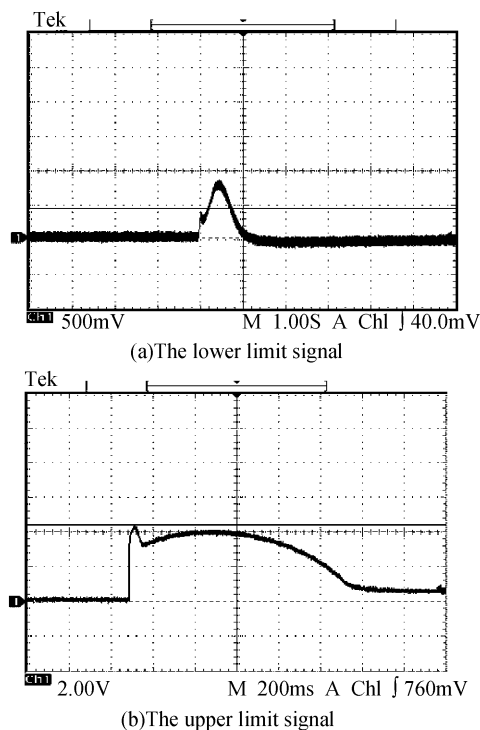


图 7 低端及高端信号示波器波形

Fig. 7 The oscillograph waveforms of the lower and the upper limit signals

测试结果表明, 本探测方案动态范围达到 120 dB ($2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \sim 3 \text{ W/m}^2$), 且此时高端信号没有饱和, 在不改变电路参量条件下也能探测到低端信号. 探测波形效果上看, 信号的高频段(主要能量集中在信号第一峰附近)部分, 高端信号探测效果要好于低端信号, 低端信号第一峰“削波”现象明显; 而高频段部分(主要能量集中在信号第二峰附近), 无论是高端信号还是低端信号, 其信号波形保持完整, 与源数据波形基本一致. 主要是因为光路中的中性滤光片和电路中的背景滤除电路在系统中均具有低通滤波器的特性. 低端信号波形受两单元的相对影响明显变大. 进一步数据分析表明, 信号各特征点相对时间关系基本与源数据波形保持一致, 无论是高端信号还是低端信号, 其误差均控制在 $\sim 1\%$ 以下. 总的来看, 探测效果可以接受.

4 结论

本文提出的将对数域压缩方案应用于瞬态微光探测的方法, 可使低端微弱的瞬态光辐射信号得到有效地增益, 同时高端信号也被压缩在较低的 ($< 15 \text{ V}$) 幅度内. 不仅降低了电路的复杂性和成本, 还有效地缓解了后续数据采集单元的设计压力, 使得系统可采用较小位宽的 ADC 完成数据采集. 但数据分析处理阶段, 噪音的影响会被放大(反变换). 在数据处理算法选择上需选择有针对性的滤波算法来完成. 整体上看, 是将硬件设计压力转移到软件分析上, 首先保证了实时探测的要求. 本文设计为瞬态光探测技术研究提供了一种新的思路, 具有一定地参考价值.

参考文献

- [1] VORPAHL J A, SPARROW J G, NEYE P. Satellite observations of lightning[J]. *Science*, 1970, **169**:860-863.
- [2] WANG Hua, WEN De-sheng, LIU Xue-bin, *et al.* Research and design of the circuit technology for spacial transient optical signal location system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1421-1425.
王华, 汶德胜, 刘学斌, 等. 空间瞬态光辐射信号定位系统电路设计与实现[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1421-1425.
- [3] GUO Rui, LIU Xue-bin, WEN De-sheng, *et al.* A detection and orientation system of lighting signal from space thunderbolt [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):953-956.
郭瑞, 刘学斌, 汶德胜, 等. 空间雷电探测实时采集系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6):953-956.
- [4] ZHANG Ying, WEN De-sheng, HAN Ya-meng, *et al.* The signal processing design of the spacial transient optical signal based on LabVIEW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 772-775.
张颖, 汶德胜, 韩亚蒙, 等. 基于 LabVIEW 空间瞬态光信号处理技术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):772-775.
- [5] CHEN Hong-bin, LÜ Da-ren. Observations of lightning from space; a review[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **59**(3): 377-383.
陈洪滨, 吕达仁. 从空间探测闪电的综述[J]. *气象学报*, 2001, **59**(3):377-383.
- [6] SUSZCZYNSKY D M, LIGHT T E, DAVIS S, *et al.* Coordinated observations of optical lightning from space using the FORTE photodiode detector and CCD imager [J]. *J Geophys Res*, 2001, **106**(D16):17,897-17,906.
- [7] WILSON B, GAHTANI AL M. Improved logarithmic converter based on a transconductance feedback amplifier// The 2001 IEEE international symposium on circuits and systems[C]. Sydney, NSW, Australia, 2001-05: 651-654.

Logarithm Compression Scheme for Detecting the Transient Feeble Optical Signal from Space

LIANG Yi-tao¹, TANG Yao², WEN De-sheng², WANG Hong², SHI Xing-chun²

(1 Henan University of Technology, School of Information Science and Engineering, Zhengzhou 450001, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the properties of transient feeble optical signal, which is the wide dynamic range and the feeble lower limit signal, a novel detecting scheme compressing signal in logarithmic field is presented. After the principle analysis of the scheme, it is implemented to choose appreciate parts, design the circuitry and test. The results indicate that the approach can make transient optical signal ranged 120 dB compress in the range of 0~5 V. And together with the circuitry design simplifies and the dissipation decreases, the troubles at the back data acquisition module can be lessened greatly.

Key words: Photoelectrical detection; Compressing in logarithmic field; Transient optical signal



LIANG Yi-tao was born in 1972. He is an associate professor at College of Information Science and Engineering of Henan University of Technology. He received the Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, in 2007, research interests focus on photoelectrical signal processing and FPGA-based system development.