

雪崩光电二极管对空激光测距接收机

霍联正

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 根据雪崩光电二极管最佳应用理论设计出一种新的激光测距接收机, 其特有的雪崩管工作电压建立方式, 使它能在很宽的温度范围内工作, 具有极强的背景辐射环境适应性, 已成功地用于对空激光测距。

Ground-to-air laser ranging receiver with avalanche photodiodes

Huo Lianzheng

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: A new kind of laser ranging receiver designed according to the optimum application theory of avalanche photodiodes is presented. The specific manner of building up avalanche photodiode operating voltage enable this receiver to operate well in wide temperature range and variable background radiation environment, and the device has been applied in ground-to-air laser range finder successfully.

一、引言

80年代, 我国的地面目标激光测距机已普遍采用雪崩光电二极管(以下简称雪崩管)为探测器, 而对空激光测距机利用雪崩管则是1990年以后的事了。为什么迟后好几年呢? 这可能与对空激光测距的特殊性有关。大体说来, 有下列三个特点:

第一, 它是对运动目标进行重复频率的激光测距, 频率一般在5~25Hz。这种工作情况下, 雪崩管偏压的建立与自动调整难于单次脉冲激光测距。

第二, 测距机遇到的背景辐射复杂多变。测距过程中进入探测器的背景辐射, 不仅晴天与阴天不同, 即使在同一个晴天, 测距机的指向不同也会带来极大的差异。当指向太阳时, 强烈的阳光可能造成高灵敏度的雪崩管的损坏。

第三, 对空激光测距机通常是某种火控跟踪系统的组成部分, 发射功率较大, 大气回散激光信号干扰很强, 较难抑制。如果采用了瞄准、电视跟踪和激光测距的“三合一”的光学系统, 光束导向的立方棱镜表面和防尘玻璃罩表面将反射极强的发射激光信号, 造成探测器-放大器通道的阻塞和元件损坏。

这些特点表明, 在对空激光测距机中应用雪崩管时, 除必须遵循雪崩管最佳应用的一般理论与实践外, 还必须有特殊的电路设计来保证雪崩管的正常工作。本文根据上述特点, 提

出一种新的雪崩管接收机电路,成功地用于一种型号项目的风冷式对空激光测距机。

二、雪崩管的最佳工作点

选用了进口的C30950E和西南技术物理所生产的SPD-052雪崩管前放组件作探测器。这种雪崩管的最佳倍增因子公式为^[1]。

$$M_{opt} = \left[\frac{i_{nx}^2}{ek(R_0 P_{bgr} + I_d)} \right]^{1/3} \quad (1)$$

式中, e 为电子电荷, 1.6×10^{-19} C; k 为空穴电离率 β 对电子电离率 α 之比, 即 $k = \beta/\alpha$; I_d 为雪崩管体漏电流, A; R_0 为倍增因子 $M = 1$ 时雪崩管的响应度, A/W; P_{bgr} 为入射雪崩管的背景辐射功率, W; i_{nx} 为放大器的等效输入噪声电流谱密度, A/Hz^{1/2}。

由于 I_d 与 P_{bgr} 难于确定, 尚不能用(1)式来确定雪崩管的最佳工作点(即工作电压)。雪崩管最佳噪声分配原理解决了这一难题, 根据这一原理, 为了使雪崩管在接近最佳倍增状态下工作, 应该让放大器贡献的噪声电压 V_{nx} (均方根值)在接收机总噪声电压 V_n 中所占的比例为^[1]

$$D = \frac{V_{nx}}{V_n} = 0.58 \quad (2)$$

式中, $V_n = \sqrt{V_{nx}^2 + V_{na}^2}$, V_{na} 为雪崩管贡献的噪声电压。(2)式将确定雪崩管最佳工作点的问题转化成了确定雪崩管的最佳放大器增益 G_{opt} 的问题。设想一个输入端接了无噪声探测器的放大器, 其增益为 G 时的输出噪声使电路产生了测距机允许的平均虚警率FAR, 那么根据(2)式, 使用雪崩管时放大器的最佳增益 $G_{opt} = G - 4\text{dB}$ 。实际上应减少4.7dB, 考虑到脉冲形式的pop噪声的影响, 只减少了4dB。用GC-1光电二极管动态测试仪测量雪崩管时发现, 雪崩管偏压从170V变到260V范围内, 其输出噪声与放大器噪声相比, 可以忽略不计^[1~3]。因此, 可以把工作偏压为200V的雪崩管作为无噪声探测器, 来确定放大器的最佳增益。增益降低后的放大器的输出噪声降低了。但是, 给雪崩管增加偏压, 当雪崩管输出的噪声使放大器的输出噪声恢复到预定平均虚警率FAR允许的噪声电平时, 雪崩管的偏压便达到其最佳工作电压。

如前所述, 对空测距遇到的背景辐射变化很大, 根据(1)式, 最佳倍增因子 M_{opt} , 因而最佳噪声分配比值 D 也将发生变化。文献〔4〕对这种变化情况作了较细致的计算与实验研究。笔者用GC-1B光电二极管动态测试仪, 在三种模拟背景辐射 P_{bgr} 条件下对SPD-052, 9102-311号管进行了测量, 测试数据列于下表。

Table Test data

P_{bgr} (W)	V_R (V)	R_{opt} (V/W)	D	P_{rmin} (W)
7.2×10^{-10}	375	2.14×10^5	0.79	4.8×10^{-9}
4.2×10^{-9}	369	1.77×10^5	0.56	9.2×10^{-9}
1.1×10^{-8}	357	1.36×10^5	0.45	1.5×10^{-8}

根据文献〔4〕的计算, 在无背景辐射与强背景辐射之间, 最佳噪声分配比值 D 的变化范

围是0.516~0.415。在弱背景辐射条件的 D 值与上表实测值差很多。原因在于雪崩管倍增噪声机理较为复杂,均匀倍增噪声理论^[6],以及以它为基础导出的 $M_{0.1}$ 公式和 D 值公式仅仅是对雪崩倍增特性的简单描写,在弱背景辐射条件下,雪崩管处于高倍增状态,其噪声行为非“高斯噪声”和“白”噪声模型所能描述。以脉冲形式出现的噪声(pop噪声)频繁出现,使平均虚警率高于Rice公式的计算值^[6]。而GC-1B型光电二极管动态测试仪正是以测距机所关心的平均虚警率 \overline{FAR} (而不是均方根噪声电压)来衡量噪声电平的。

由上表看出,根据(2)式来确定雪崩管的最佳工作点仅是一个折衷决策。为了使雪崩管在黑夜和晴天等各种背景辐射环境下能以最佳倍增状态工作,应该改进接收电路设计,或者增加自动增益控制(AGC)电路,使放大增益随背景辐射减弱而增大,或者采取自动阈值控制(ATC)电路,使成形电路阈值随背景辐射减弱而降低。这是我们今后应该进行的工作。

三、接收机电路设计

我们研制的是一种风冷式重复频率激光测距机。根据对空测距的特点设计的接收机电路图示于图1。其工作原理与一般激光测距机一样。PIN光电二极管将发射激光取样信号转

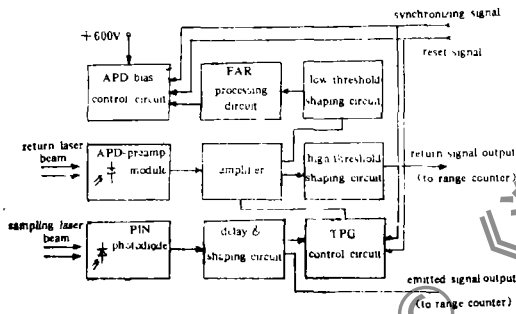


Fig.1 Laser rangefinder receiver circuit block diagram

换为电信号。经延迟、整形后送至距离计数器作计时起始信号。目标反射的激光回波信号,被雪崩管前放组件接收,输出的电信号被放大器放大、高阈值电路整形定送到距离计数器作计时停止信号,从而,出到目标的距离。高阈值电路输出的噪声脉冲速率等于或稍低于测距允许的平均虚警率。低阈值电路输出的虚警率很高,经FAR处理电路后去控制雪崩管工作电压。

雪崩管偏压电源按新的程式工作。参看图2。 t_1 时刻,同步信号输入TPG控制电路和APD偏压控制单元,使放大器处于高增益(正常增益)状态,偏压电源中的储能电容器开始充电,电压迅速上升。随着偏压升高,雪崩管倍增因子增大,因而输出噪声电平升高,放大器输出的噪声电压也升高,阈电路输出的噪声脉冲速率也增大。当放大器输出噪声电压达到预定的 V_n 值时,阈电路输出的噪声脉冲速率也达某预定值,FAR处理电路便输出一脉冲信号给偏压控制电路,使储能电容器停止充

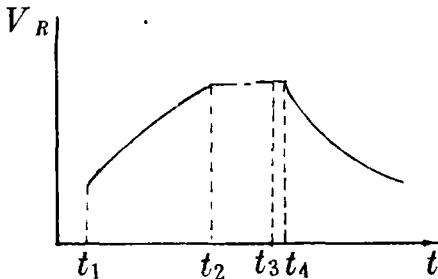


Fig.2 APDs V_R-t curve

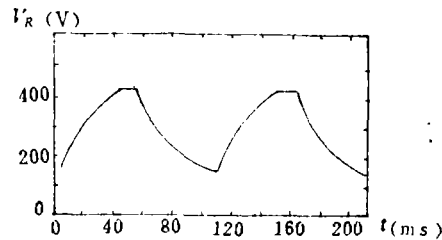


Fig.3 APDs V_R-t test curve in two ranging periods

电。以后便保持在这一电压等待测距的进行。此电压正是雪崩管的最佳工作电压。此乃图2

中的 t_2 时刻以后。 t_3 时刻发射激光,开始测距。测距结束后 $200\mu\text{s}$ 到 t_4 时刻,放电回路使偏压降到最低值。待下一个同步脉冲来时又重复上述过程。图5示出两个测距周期中雪崩管偏压的实际变化波形。这种电路已实现了每秒5次和10次的测距,也不难实现每秒20次以上的测距,更适用于单次脉冲激光测距。

在此电路中,雪崩管偏压控制全部由数字电路完成。电路调试方便,工作可靠性高,而且便于集成化。我们已把它作成混合集成电路组件。

这种偏压电源的工作程式赋予雪崩管对温度与背景辐射环境极强的适应性。雪崩管具有正的工作电压温度系数(典型值为 $2.2\text{V}/^\circ\text{C}$)。其含义是,为了使雪崩管倍增因子恒定,其工作电压应随环境温度升高而升高,反之亦然。雪崩管一定的倍增对应于一定的输出噪声电平,因而对应于一定的虚警率FAR。本接收机电路正是按给定的恒定虚警率FAR值,在不同温度下建立相应的最佳工作电压。图4给出对雪崩管组件SPD-052(9201-044号)所作的高低温度实验曲线。由于输入的直流高压不同,a,b两组曲线显得不衔接,但它直观地展示了雪崩管的温度特性和电路的工作情况。

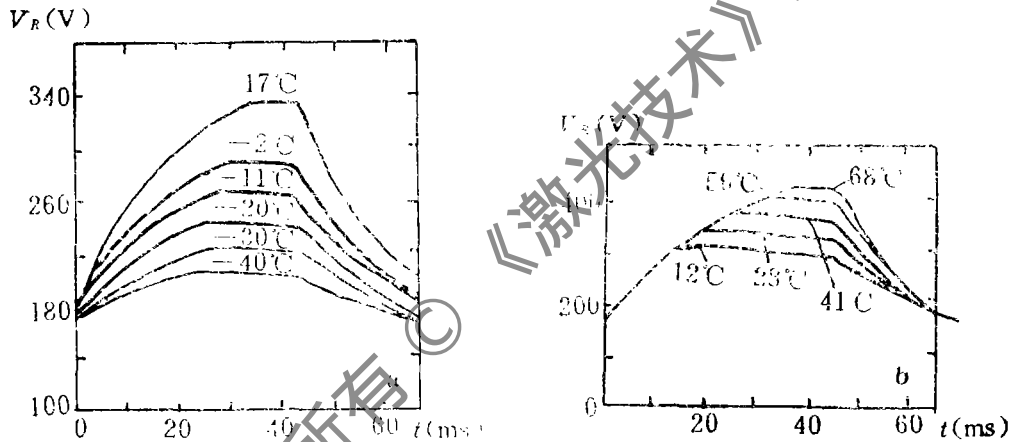


Fig.4 APDs V_R-t test curve in several temperature
a—Low temperature b—High temperature

背景辐射对雪崩管工作有严重影响。在整机室外实验中,当测距机指向不同方向,对着不同背景辐射条件时,从示波器上观察到高低不同的雪崩管工作电压波形,它们可以组成类似图4b的曲线。测距机迎向太阳时,偏压升不起来,雪崩管处于低倍增状态,避免了损坏的危险。

由同步信号、氙灯触发信号和发射激光取样信号三者控制产生了时序增益(TPG)控制信号,用以控制放大器增益,使发射激光时,放大器增益比正常增益少40dB以上,以后逐渐恢复到正常增益,从而消除激光发射时很强的大气回散激光信号对测距过程的干扰。

整机采用了“三光合一”的光路系统。接收机设计有特殊的保护电路,避免了立方棱镜表面与防尘玻璃罩表面反射的极强的激光信号对雪崩管组件的损害。

+600V直流电压从激光器储能电容器取得,不必另外专门制作升压直流变换器。

测距机接收天线是一个焦距/口径比为4的物镜,干涉滤光片置于锥形光束中(关于背

景辐射与光路设计问题另有专文论述)。滤光片峰值波长1066~1066.5nm,透射率大于70%,带宽10nm。虽然整机光路复杂,光能损耗较大,仍能达到 $2 \times 10^{-8} \text{W}$ 的最小接收功率。

外场实验表明该接收机完全满足对空激光测距机的要求。

四、结 束 语

1. 根据最佳噪声分配原理,确定一个最佳放大器增益,在放大器前接上雪崩管组件,以恒虚警率去控制雪崩管偏置电压上升高度,当达到最佳工作电压时,即进行测距。这是一个顺理成章的优化工作过程。接收机以崭新的电路设计实现了这一优化逻辑过程。

2. 接收机可以在各种背景条件下进行测距,但只有晴天背景下雪崩管才处在最佳或接近最佳倍增状态。为使在各种背景(特别是黑夜和黄昏)条件下雪崩管都工作在最佳倍增状态,有必要在阈值电路中增加ATC电路。

3. 此接收机电路除放大器外,其它部分基本上已数字电路化,既工作可靠又便于集成,已将它制成三个混合集成电路组件。

邓崇俊、周素清、田子文和李杰同志参加了本文的实验工作。

参 考 文 献

- [1] 霍联正. 激光技术, 1983; 12(2): 1
- [2] 霍联正. 兵器激光, 1986; (6): 51
- [3] 霍联正. 雪崩光电二极管的动态测量. (待发表)
- [4] 唐中华. 激光技术, 1992; 16(5): 262
- [5] McIntyre R J. IEEE Trans Electron Devices, 1966; 13: 164
- [6] 史斯伍 瑛译校. 电光学手册. 北京: 国防工业出版社, 1978: 87

作者简介: 霍联正, 男, 1936年3月出生。高级工程师。现从事激光接收技术和光电技术研究。

收稿日期: 1992年12月25日。

• 简 讯 •

小型玻璃激光系统发射1.54 μm 单模光

一种掺铈和铽的磷酸盐玻璃激光器单纵模运转可发射10kHz线宽的1540nm激光,最大输出功率15mW。意大利米兰的量子电子与电子仪器中心以及Italtel公司的开发者们说,这种装置的线宽大于分布反馈式激光器不到一个量级,输出功率高于它一个量级。

该激光器结构采用小型谐振腔,内装2.5mm厚磷酸盐圆片激光玻璃、1-W型宽面积980nm InGaAs 激光二极管泵浦和凹镜输出耦合器。配有300 μm 法布里-珀罗标准具以保证单模输出,180GHz附近波长调节由改变标准具的倾斜度来实现。性能和圆片式输出器件对于相干光通信、计量学和光谱学应用都是有吸引力的。

译自L F World, 1993; 29(3):9 中尧译 马理校