

激光测距应用中雪崩光电二极管最佳工作状态的再研究

唐中华

(华北光电研究所, 北京)

摘要: 回顾了雪崩光电二极管最佳工作状态的确定方法。根据R.J. McIntyre给出的关于达通型雪崩光电二极管的噪声谱密度结果, 分析了不同背景下, 确定最佳工作状态的最佳噪声分配比的特性, 并给出了实验结果。给出了不但能确定和保持雪崩光电二极管的最佳工作状态, 而且可以保持恒定的虚警率的实用方法。

Further research on optimum operating state of avalanche photodiode in application of laser ranging

Tang Zhonghua

(North China Research Institute of Electro-Optics)

Abstract: Methods of determining optimum operating state of avalanche photodiode (APD) are reviewed. Based on the result of noise spectral density for Reach-through APD that was given by R.J. McIntyre, characteristics of optimum noise distribution ratio with which optimum operating state is determined in different background, is analysed, and experimental result is given. A practical method is given that is not only determining and keeping optimum operating state of APD but also holding false alarm rate (FAR) constant.

一、讨论和回顾

雪崩光电二极管因其量子效率高, 具有内增益, 可将光电信号倍增上百倍, 而倍增后噪声仅与放大器自身噪声水平相当, 从而冲破了晶体管宽带放大器制作水平的限制, 大大提高了接收系统的信噪比, 因此, 被广泛用于激光测距机的接收系统中。另外, 雪崩光电二极管在倍增过程中产生的附加噪声又成了限制信噪比进一步提高的障碍, 因而引出了如何在最大信噪比的条件下, 确定最佳倍增因子的问题。我们知道, 在工程应用中, 通常把放大器输入端的总均方噪声电流表示为:

$$i_a^2 = i_{n_x}^2 + i_{n_f}^2 \cdot M^2 \cdot F(M) \quad (1)$$

$$\text{式中, } i_{n_f}^2 = 2q(R_0 P_{b_x} + I_d) \cdot f \quad (2)$$

i_{n_f} 为雪崩管倍增前产生的均方根散粒噪声电流; i_{n_x} 为放大器等效输入均方根热噪声电流;

q 为电子电荷, I_d 为雪崩光电二极管体漏电流, R_0 为雪崩管($M=1$)的辐射响应度, $P_{b_{gr}}$ 为照射到雪崩管上的背景辐射功率, M 为倍增因子, $F(M)$ 为过剩噪声系数, f 为放大器的带宽。

雪崩光电二极管输出的信号电流为:

$$i_s = R_0 M P_r \quad (3)$$

式中, P_r 为接收到的激光脉冲功率。

因此, 信噪比为:

$$S/N = \{(R_0 M P_r)^2 / [i_{nx}^2 + i_{nf}^2 M^2 F(M)]\}^{1/2} \quad (4)$$

由上式可以看出, 当 $d(S/N)/dM = 0$ 时, S/N 有极大值。此时的倍增因子为最佳倍增因子 M_{opt} , 雪崩管处在最佳工作状态 (或称最佳工作点)。 M_{opt} 应满足下式:

$$i_{nx}^2 / i_{nf}^2 = M_{opt}^3 (dF/dM) / 2 \quad (5)$$

令:

$$Q = i_{nx}^2 / i_{nf}^2 \quad (6)$$

(a) 若 $F(M) = M^x$, [1, 6, 7] 则有:

$$dF/dM = x M^{x-1} \quad (7)$$

$$M_{opt} = (2Q/x)^{1/(2+x)} \quad (8)$$

(b) 若 $F(M) = M[1 - (1-K)(M-1)^2/M^2]$ [3, 4] (9)

或 $F(M) = KM + (1-K)(2-1/M)$ [2] (10)

则有:

$$M_{opt}^3 + M_{opt}(1-K)/K - 2Q/K = 0 \quad (11)$$

此一元三次方程的实数解为:

$$M_{opt} = \{Q/K + [(Q/K)^2 + (1+K)^3/(3K)^3]^{1/2}\}^{1/3} + \{Q/K - [(Q/K)^2 + (1-K)^3/(3K)^3]^{1/2}\}^{1/3} \quad (12)$$

考虑到实际应用中, 总有:

$$(Q/K)^2 \gg (1-K)^3/(3K)^3 \quad (13)$$

因此, M_{opt} 近似为:

$$M_{opt} = (2Q/K)^{1/3} = i_{nx}^2 / [qK(R_0 P_{b_{gr}} + I_d)f]^{1/3} \quad (14)$$

由 M_{opt} 我们可以分别确定出雪崩管偏压 $V_{d_{opt}}$, 放大器输出总均方根噪声电压 $V_{n_{opt}}$, 接收系统的最佳工作状态随之而定。

二、实用最佳工作状态确定关系的讨论

由(14)式可以看出, M_{opt} 与雪崩管上背景辐射功率 $P_{b_{gr}}$ 有关, $P_{b_{gr}}$ 除了与接收系统的光学参数有关外, 主要取决于空中背景辐射功率 P_b 的大小。 P_b 的精确测定是不容易的。因此, (14)式作为确定最佳工作状态的关系是不实用的。应将其转换为可测参数表达的形式。文献[1]中给出了 $F(M) = M^x$ 条件下的较为实用的最佳工作状态确定关系:

$$K_r = V_{nx}/V_{no} = (x/2)^{1/2} \quad (15)$$

式中, V_{no} 为放大器输出的总噪声电压 (均方根值, 下同), V_{nx} 为放大器自身的噪声电压, K_r 为二者均方根噪声电压的比值。

$$V_{nx} = i_{nx} R_L G_v \quad (16)$$

式中, R_L 为雪崩管的等效负载电阻; G_v 为放大器增益。

对于硅器件来说, $x=0.4$, 则 $K_r=0.41$, 为一常数。

(15)式表述了用调整放大器增益 G , 来改变可测参数 V_{ax} , 使常量 V_{ax} 与其比值 K_r 为一常数, 代替测定 P_b , 求解 M_{opt} 的方法, 来确定雪崩管最佳工作状态。其意义在于把确定雪崩管最佳工作状态的问题转化为确定放大器最佳增益 G_{opt} 的问题。(15)式也表明了雪崩光电二极管应用中的最佳噪声分配的关系^[3]。

但对于达通型雪崩光电二极管(如C30950E, $K=0.02$)来说, 用 $F(M)=M^x$ 关系(此时对应 $K=1$)描述雪崩光电二极管的噪声倍增特性是不合适的^[2]。应选用(10)式, 并使 $M=M_{opt}$, 则有:

$$K_r = \left\{ \frac{1 + [(1-K)/(KM_{opt})](1/M_{opt})}{3 + [(1-K)/(KM_{opt})](4 - 1/M_{opt})} \right\}^{1/2} \quad (17)$$

显然, K_r 是与 M_{opt} 有关, 也与背景 P_b 有关的变量, 而不是常数。一般实用中总满足 $M_{opt} \geq 50$, 因此, (17)式可近似为:

$$K_r = V_{ax}/V_{ao} = \{1/[3 + 4(1-K)/(KM_{opt})]\}^{1/2} \quad (18)$$

下面利用已得到的关系式, 结合具体的实用激光测距系统, 求解出 $M_{opt}(P_b)$ 、 $K_r(M_{opt})$ 、 $S/N(M_{opt})$ 随背景 P_b 大小变化的特性。计算结果参见表1及图1。其中: $i_{ax}=6 \times 10^{-9} A$; $R_0=0.25$; $f=26MHz$; $I_d=2 \times 10^{-11} A$; 最大辐射功率 $P_{bmax}=100W \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1} \cdot m^{-2}$ (相当于亮云背景)^[5]; $P_r=3 \times 10^{-8} W$ 。

表1 最佳状态下各参数随背景变化的理论分析结果

P_b/P_{bmax}	M_{opt}	K_r	S/N	K_{r1}
0	258.9	0.516	55.7	0.8
0.125	110.6	0.458	21.1	0.71
0.25	88.9	0.439	16.3	0.681
0.375	77.8	0.428	13.9	0.664
0.5	70.9	0.418	12.4	0.650
0.625	65.9	0.412	11.3	0.638
0.75	62	0.406	10.5	0.629
0.875	58.9	0.401	9.8	0.621
1	56.4	0.396	9.3	0.615

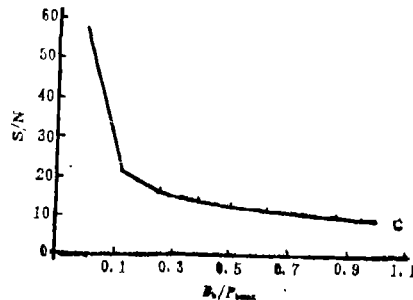
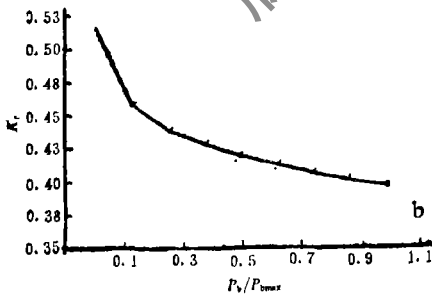
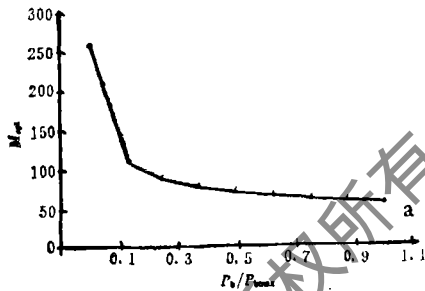


图1 最佳状态下各参数随背景变化的关系图

- a—最佳倍增因子与背景功率的关系
- b—最佳噪声分配比值与背景功率的关系
- c—最佳状态下信噪比与背景功率的关系

(a)由图1a可以看出, M_{opt} 随着背景增大而下降^[7]。

(b)由图1b可以看出, K_r 在不同背景下不是常数, (15)式的 K_r 值是一系列 K_r 值中的一个。因此, 将其以常数作为最佳工作状态的判据是不充分的。

(c)由图1c可以看出, 在最佳工作状态下的信噪比 $S/N(M_{opt})$ 随着背景的增大而降低, 尽管 $S/N(M_{opt})$ 在某背景下是最大的, 当背景增大时, 还是要下降的。

(d)由 $V_{no} = V_{nx}/K_r$, 且 V_{nx} 为常数, 可以看出, 放大器输出的总均方根噪声电压 V_{no} 随背景的增大而增大, 随背景的减小而减小。 V_{no} 的这种变化仅由雪崩管自身噪声倍增特性 $F(M)$ 所决定, 而没有涉及POP噪声的影响。

三、实验结果

1. 对于不带前放的单雪崩管来说, 可以用PIN管代替雪崩管来测 V_{nx} 值, 因为, 用PIN管时, 总噪声电压以放大器的噪声电压为主。用西南技物所生产的GC-1光电二极管动态测试仪测试的结果如下:

有强背景时, $K_{r,opt} = 0.40$;

无背景时, $K_{r,opt} = 0.61$ 。

将此结果列于表2中, 并与表1的计算结果比较, 在有强背景时, 两个数据是很吻合的, 在无背景时有偏差。

2. 对于带有前放的雪崩光电二极管组件来说, 上面的方法就不适用了。我们利用偏压为200V时, 雪崩管组件的噪声最小的特性^[6], 用此时无背景条件下的放大器输出噪声电压值 V_{nx1} (也是常数) 代替 V_{nx} , 此时, M 约为30, 雪崩管组件的表面漏电流较大, 因而 V_{nx1} 总比 V_{nx} 要大, 通过实验测得: $V_{nx1} = \beta V_{nx}$ 中的 β 值为1.4~1.7 (不同管子取值有差异)。若用 β 乘表1中 K_r , 可计算出此值:

$$K_{r1} = V_{nx1}/V_{no} \quad (19)$$

随背景变化的规律。若取 $\beta = 1.55$, 则具体计算结果见表1。

我们在实际测距系统上测量了在不同背景条件下最佳工作状态时, 比值 K_{r1} 随之变化的特性。系统参数同前。具体方法如下: 首先, 将偏压置成200V, 测得在某阈值条件下满足恒定虚警率 \overline{FAR} 要求的放大器输出的最大噪声电压 $V_{no,max}$ 。设最佳放大器增益为 G_{opt} , 则最佳噪声分配比值 $K_{r1,opt}$ 可表示为:

$$K_{r1,opt} = V_{nx1}G_{opt}/(V_{ni}G_{opt}) \quad (20a)$$

式中, $V_{nx1} = V_{nx1}G_{opt}$; $V_{no} = V_{ni}G_{opt}$ 。

为了实验求得 $K_{r1,opt}$, 我们在强背景和无背景两种条件下, 通过调整放大器增益 G_r , 使放大器输出噪声电压 $V_{nx1} = V_{nx1}G_r$ 随之改变, 使比值:

$$K_{r1} = V_{nx1}G_r/V_{no,max} = (V_{nx1}G_{opt})/[(G_{opt}/G_r)V_{no,max}] \quad (20b)$$

分别为0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8和0.9。等效于用 $(G_{opt}/G_r)V_{no,max}$ 代替 V_{no} 。再将偏压调高直至满足同一虚警率 \overline{FAR} , 对一固定目标进行测距, 测得回波幅度的大小, 进而求得信噪比随 K_{r1} 值分别在强弱不同的背景下变化的特性。参见图2。

从图2可以看出, 在有强背景时, $K_{r1} = 0.6$ 回波信号幅度最大。无背景时, $K_{r1} = 0.8$ 处回波信号幅度最大。将此测量结果列于表2中, 并与表1中 K_{r1} 计算结果比较, 可以看出, 二者是较一致的。

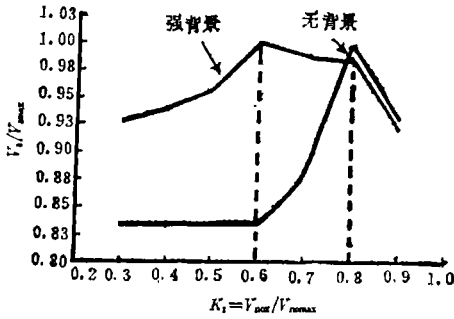


图2 不同背景下回波信号与噪声分配比值关系的测量曲线

表2 最佳状态下噪声分配值随背景变化的分析结果与实验结果比较

P_b/P_{bmax}	$K_{r,测}$	$K_{r,计}$	$K_{r,1测}$	$K_{r,1计}$
0 (无背景)	0.51	0.61	0.8	0.8
0 (强背景)	0.39	0.40	0.6	0.615

因为在强背景下, $K_{r,1,opt} = 0.6$, $V_{n,1}$ 又是常数, 此时有: $V_{n,0} = V_{n,0,max}$ 。所以有: $G_v = G_{v,opt}$ 。这就提供了一个求最佳放大器增益的方法。即: 首先, 测得在偏压为200V时, 满足某阈值虚警率要求的最大噪声电压 $V_{n,0,max}$, 调节放大器增益 G_v , 使比值 $K_{r,1} = 0.6$, 此时的增益为最佳放大器增益。用此方法可代替测 P_b , 求 M_{opt} 的方法, 来确定雪崩管的最佳工作状态。除此之外, 还要考虑到 $K_{r,1}$ 作为确定雪崩管最佳工作状态的判据参数是随背景变化而改变的, 因此, 应设计辅助电路使 $K_{r,1}$ 值在不同的背景下作相应的调整, 以保持雪崩光电二极管在不同的背景下处于最佳工作状态。

四、最佳工作状态的保持

从表1中我们可以看出, 只要在不同背景下, 自动调整偏压为200V时, 放大器输出的噪声电压与加高偏压时输出的总噪声电压比值满足表1中 $K_{r,1}$ 的要求, 就可保持雪崩管工作在最佳状态。因为 $V_{n,1}$ 是常数, 由(19)式可以看出, $K_{r,1}$ 的自动调整, 实际上就是放大器输出总噪声电压的自动控制。这恰好与激光测距接收系统的恒虚警率要求一致。

虚警率是用单位时间内超过阈值噪声脉冲个数来衡量噪声大小的, 是个统计平均值, 与用均方根值衡量噪声大小概念不同。当噪声模型为白噪声时, 恒虚警率意味着均方根噪声电压不变; 但噪声模型偏离白噪声时, 情况则有所不同。

我们通过调整偏压 (即改变倍增因子) 来保持恒定的虚警率, 并在开环的条件下实测了放大器输出总噪声电压随背景改变的特性。结果参见表3。

从表3可以看出, 在保持恒定虚警率的条件下, 背景较大时, M 较小, POP 脉冲噪声很小, 这时的噪声可以看作是白噪声, 放大器输出的总均方根噪声电压 $V_{n,0}$ 随着背景的变化很小。在背景较小 M_{opt} 较大时, 雪崩管接近雪崩点, 产生脉冲形式的噪声 (POP 噪声) 占总噪声中的比例增大, 使噪声模型偏离白噪声, 虚警率没有改变, 却使 $V_{n,0}$ 减小。

若适当选取放大器增益 G_v , 使偏压为200V时的噪声电压 $V_{n,1}$ 满足无背景时 $K_{r,1} = 0.8$ 所对应的值, 即使 $V_{n,1} = 0.8 \times V_{n,0,min}$ 。并用下式求得在不同背景下, 恒虚警率条件要求的噪声分配比值:

$$K_{r,FAR} = [0.8 \times (V_{n,0,min}/V_{n,0,max})] / (V_{n,0}/V_{n,0,max}) \quad (21)$$

即: $K_{r,FAR} = V_{n,1}/V_{n,0}$ 。结果见表3。

将 $K_{r,FAR}$ 的数据与表1中 $K_{r,1}$ 的数据比较, 参见图3, 二者是较一致的。即在最佳工作状态下, 基于雪崩管噪声倍增特性的噪声分配比值 $K_{r,1}$ 与含有POP噪声满足恒虚警率要求的噪声

表3 恒虚警率条件下噪声电压及噪声分配比值随背景变化的实测结果

P_b/P_{bmax}	V_{n0}/V_{n0max}	$K_{r,FAR}$	$K_{r,1}$
0	0.775	0.8	0.8
0.125	0.89	0.697	0.71
0.25	0.925	0.67	0.681
0.375	0.96	0.646	0.664
0.5	0.985	0.629	0.650
0.625	0.99	0.626	0.638
0.75	1.0	0.62	0.629
0.875	1.0	0.62	0.621
1	1.0	0.62	0.615

分配比值 $K_{r,FAR}$ 在不同背景变化中, 数据比较接近, 最大误差仅为 3%。由此可得出结论, 保持恒虚警率的同时, 也保持了雪崩管的最佳工作状态。而不象其它自动增益控制系统, 保持恒虚警率是以牺牲信噪比为代价的。

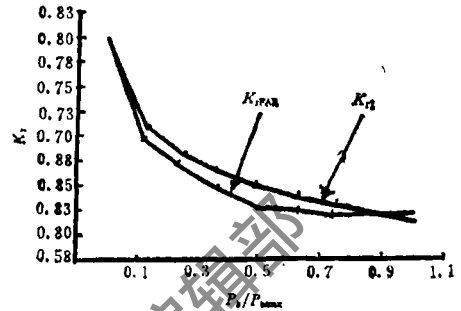


图3 $K_{r,FAR}$ 与 $K_{r,1}$ 随背景变化关系曲线的比较

五、结 论

1. 把噪声分配比值 K , 看作常数并作为确定雪崩光电二极管最佳工作状态的判据是不充分的。使雪崩光电二极管在不同背景条件下处于最佳状态, 要满足两个条件: (a) 保持噪声分配比值 K , 为一适当值 (通过测定最佳放大器增益 $G_{v,opt}$ 实现); (b) 保持恒定的虚警率。

2. 保持恒定的虚警率, 不但不会使信噪比减小, 反而使雪崩管始终处于最佳工作状态下, 使接收系统的信噪比保持最大。

3. 表1给出了噪声分配比值 $K_{r,1}$ 在不同背景时变化的典型的理论分析数据结果, 表2给出了相应的实验结果, 验证了理论结果的正确性。

4. 综上所述, 可以采用下面的方法确定和保持雪崩光电二极管的最佳工作状态:

(a) 在无背景条件下, 偏压为 200V 时, 测得某一阈值下虚警率为 FAR 的最大噪声电压值 V_{n0max} , 下调放大器增益 G_v , 使输出总噪声电压 V_{n01} 与 V_{n0max} 的比例 $K_{r,1}$ 为 0.6, 此时, $G_v = G_{v,opt}$ 。

(b) 调整噪声自动增益控制环路的参数, 使噪声电压的归一化值 V_{n0}/V_{n0max} 在不同背景下的变化规律, 与表3中 V_{n0}/V_{n0max} 的变化规律一致, 这样, 既保持了恒虚警率, 又保持雪崩管的最佳工作状态。

参 考 文 献

- [1] 霍联正, 余永琪. 兵器激光, 1979; (4): 19~24
- [2] 喻其寿. 兵器激光, 1983; (5): 19
- [3] 霍联正. 激光技术, 1988; 12(2): 1
- [4] McIntyre R J. IEEE Trans Electron Devices, 1966; ED-13(1): 164
- [5] Walter J F. 激光与红外, 1979; 副页22: 31
- [6] 霍联正, 兵器激光, 1986; (6): 51

一种测定单层薄膜光学常数的新方法*

钟 钦 曾 明

(国防科技大学应用物理系, 长沙)

摘要: 本文介绍一种新的迭代法和条件优化方法, 用于单层非吸收膜和吸收膜的光学常数的精确测定。一般方法中的多解问题在这里被很好地抑制和消除。文中给出一些介质膜和金属膜的测定实例, 其多角度入射下的反射率和透射率值都是在DF透反仪上测量得到的。

A new method for determination of optical constants of optical coatings

Zhong Qin, Zeng Ming

(National University of Defence Technology)

Abstract: A new iteration and conditional optimization method for calculating the optical constants of nonabsorbing and absorbing single-film, based on the measuring the reflectance and transmittance at different incident angles, is given out. The problem of multiple solution which often happens in other method is well eliminated. The measuring results of several dielectric and metal thin films are given, and the reflectances and transmittance are measured by DFTR-meter.

一、引 言

为了高质量光学薄膜的制备, 尽可能精确地测定其光学常数是非常必要的。多年来, 在这个课题上的大量文章^[1~10]证明了它的重要性。目前, 已经发展了许多确定薄膜光学常数的方法, 但似乎每个实验室都有自己所选择的方法。在这些方法中, 直接测量光强度值(偏振光或非偏振光测量), 特别是透射光谱测量法, 仍然是很普遍使用的方法。在大部分情况

* 本文内容在TFC'91全国薄膜学术讨论会上被录用。

[7] 高增益雪崩探测器。激光译丛, 1974; (4): 12

*

*

*

作者简介: 唐中华, 男, 1958年出生。工程师。1983年毕业于清华大学无线电电子学系。现从事激光及其应用技术的研究工作。

收稿日期: 1992年4月30日。