

光纤数字通信接收机

杨恩泽 杨同友 编著
人民邮电出版社



73-45-
551

光纤数字通信接收机

杨恩泽 杨同友 编著



人民邮电出版社

8510384

内 容 提 要

本书讲述光纤数字通信接收机的组成、设计原理,并以相当大的篇幅分析了接收机的灵敏度与噪声之间的关系、接收机灵敏度的计算以及光纤数字通信系统的设计原理,全书共分五章:第一章光纤数字通信系统接收机的噪声和灵敏度分析;第二章光纤数字通信接收机灵敏度的计算;第三章光纤数字通信接收机的设计原理;第四章光纤数字通信系统设计原理;第五章外差光纤通信。

本书主要是为光纤通信专业的技术人员,大专院校的师生、研究生和高年级学生编写的。

D021/02

光纤数字通信接收机

杨恩泽 杨同友 编著

责任编辑:董献忱

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1984年9月 第一版

印张: 6 16/32 页数: 104 1984年9月天津第一次印刷

字数: 145千字

印数: 1—6,000册

统一书号: 15045·总2911—有5874

定价: 0.82元

序 言

光纤通信是七十年代新兴起来的一种通信方式，它具有许多优越性，如通信质量高而造价及维护费用低，因而引起了人们极大的兴趣和重视，获得了迅速的发展，给通信事业的发展开辟了新的道路。

数字通信较模拟通信在信噪比方面的要求低得多，而质量又较高，因此在长距离及中短距离的光纤通信系统上都采用了数字通信制式。光纤数字接收机是光纤数字通信系统的重要组成部分。作者在讲课教材的基础上编写了这本书。

灵敏度是接收机的关键指标，噪声分析是灵敏度计算的基础，因此本书用较多的章节分析噪声及灵敏度问题。目前光接收机中所采用的光电检波器多为半导体的雪崩光电二极管(APD)及PIN光电二极管。APD或PIN管所产生的噪声及其后面的放大器所产生的噪声构成光接收机的总噪声。APD本身有增益作用，其输出的噪声占接收机总噪声的主要部分，而且其量值与输入光信号的脉冲强度，宽度及波形都有关系。因此分析及计算较复杂。目前在短波长的接收机中用APD的较多，而在长波长中却用得较少。但随着工艺技术的逐渐成熟，长波长APD也会较多地采用，因此对用APD的接收机的噪声及灵敏度进行分析及计算在目前及将来都有实用意义。PIN管可以看成是倍增因子为1的APD。用PIN管的接收机可以看成是用APD的接收机在倍增因子为1时的特例。这种接收机的噪声基本上由放大器噪声来决定，PIN管的噪声一般可忽略，所以

PIN管接收机的噪声及灵敏度的计算比较简单。

在光接收机中，前置放大器及均衡器也有其特殊性，因此本书也用一定的章节分析这两个问题。

考虑到光纤通信系统接收机的灵敏度特性对光纤通信系统的通信距离有很大的影响，因此本书综合分析了接收机灵敏度，光纤特性及发送功率与通信距离的关系。

最后，考虑到各国在外差光纤通信技术的研究已蓬勃开展，所以在第五章中简单地介绍了这种通信技术。

本书主要是为光纤通信专业的技术人员，大专院校的教师、研究生和高年级学生编写的。

光纤通信是一门多学科的崭新的通信技术，涉及的理论基础很广，作者水平和实际经验有限，错误和不妥之处在所难免，望读者批评指出。

作者。 1983.9月于武汉

目 录

第一章 光纤数字通信系统接收机的噪声和灵敏度分析

.....	1
§1 光电检波器.....	2
1•1 光纤通信系统对光电检波器的要求	2
1•2 雪崩光电二极管(APD).....	4
§2 光接收机的噪声分析.....	10
2•1 光接收机的基本性能	10
2•2 光接收机噪声电压的计算	14
2•3 场效应晶体管 (FET) 和双极型晶体管 (BJT) 放大器的噪声分析	35
2•4 误码率	39
2•5 b_K 、 $b_{\max}$ 和 $b_{\min}$ 的物理意义	45
§3 光接收机的灵敏度分析.....	46
3•1 光接收机的量子极限	47
3•2 光接收机的灵敏度	49
3•3 均衡	54
3•4 不完善调制对灵敏度的影响	61
3•5 计算公式的误差分析	65
3•6 高斯近似条件下三种灵敏度计算公式的比较	73
附录 I	76
第二章 光纤数字通信接收机灵敏度的计算.....	92

§1 基本参数的计算	92
§2 APD光接收机灵敏度的计算	96
2.1 发送端光脉冲为理想矩形脉冲的情况	96
2.2 发送端光脉冲为非理想矩形的情况	102
2.3 不同占空比光脉冲信号的对比	105
§3 PIN-FET 组合的光接收机灵敏度	107
§4 光接收机灵敏度的恶化量	110
4.1 非理想均衡的恶化量	110
4.2 消光比对灵敏度的恶化量	114
§5 光接收机灵敏度三种计算方法的简单比较	115
5.1 矩母函数和半不变矩母函数	116
5.2 精确算法	118
5.3 切诺夫界限 (Charoff Bounds) 法	120
第三章 光纤数字通信接收机设计原理	125
§1 无反馈前放级的前端	125
1.1 低阻抗前端的前放级	126
1.2 高阻抗前端的前放级	127
§2 互阻抗放大器	128
2.1 互阻抗放大器的频率特性	129
2.2 互阻抗放大器的噪声特性	132
2.3 互阻抗放大器的设计	138
§3 光接收机的动态范围	143
第四章 光纤数字通信系统的设计原理	146
§1 系统设计中某些问题的考虑	146
1.1 中继距离与光功率强度关系	147
1.2 中继距离与光纤线路带宽的关系	148
1.3 线路码型的考虑	149

§2 系统长度及灵敏度计算举例	152
2.1 短波长系统	152
2.2 长波长系统	157
§3 发送端光功率的考虑	160
3.1 光纤中的受激布里渊散射	161
3.2 提高光纤受激布里渊散射临界值的方法	162
第五章 外差光纤通信	164
§1 外差光纤通信的基本原理	165
§2 外差光接收机的灵敏度分析	170
2.1 光接收机的噪声	170
2.2 外差光接收机的灵敏度	173
2.3 ASK外差系统接收机灵敏度计算	176
§3 半导体激光器的频率稳定	180
§4 半导体激光放大器	182
4.1 信号增益与信号饱和功率	184
4.2 噪声特性	187
§5 接收光波与本机振荡光波的偏振匹配	189
5.1 偏振保持光纤	190
5.2 偏振控制器	192
参考文献	194

第一章 光纤数字通信系统接收机的 噪声和灵敏度分析

在现代数字通信系统中，人们对通信性能的基本要求是：在一定发送功率下获得最大的通信距离及在一定时间间隔内传输足够大的信息量。前者意味着接收机的输入信号极为微弱，后者要求接收机应具有较宽的带宽，因而引起较大的输出噪声功率。以上两点说明，为了保证一定的输出信噪比，降低通信系统中外部及内部的干扰噪声是极为重要的问题。

在光纤通信系统中，由于光纤本身具有防止外部干扰的能力，因此，内部噪声成为通信系统的基本限制因素，因而降低光纤通信系统的内部噪声就成为必须解决的关键问题。接收机是通信系统的重要组成部分，在研究接收机的性能时，应先探讨其内部噪声的机理，进而研究降低其内部噪声的方法及计算其在受噪声限制的情况下所能接收的最低信号功率，即灵敏度。

在雪崩光电二极管（APD）作为光电检波器的光接收机中，由于接收的光信号本身存在量子起伏及APD存在倍增起伏等现象，使APD的输出噪声成为接收机的主要噪声成分。这一部分的噪声功率又与输入光信号功率的强弱有关，因而APD光接收机的噪声分析、计算及测试具有与其它通信方式的接收机完全不同的特点，分析和计算较复杂，测试较困难。

光纤数字通信系统的组成如图1.1所示。它主要由光发送机、光纤（或光缆）和光接收机三部分组成。光接收机主要由

光电检波器、放大器、均衡器和判决器组成。从原理上说，光电倍增管，光电晶体管和光电二极管等都可以作光接收机的光电检波器，但在通信中，绝大多数都用半导体材料制成的PIN光电二极管和APD。PIN光电二极管可以看作是倍增为1的APD。所以，本章的任务是：首先从应用的角度对APD的工作原理进行简要的讨论，然后对光接收机的噪声和灵敏度进行较详细的分析，为光接收机的设计打下基础。

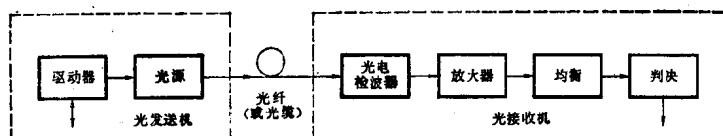


图 1.1 光纤数字通信系统方框图

§ 1 光电检波器

1.1 光纤通信系统对光电检波器的要求

光电检波器是光纤通信系统的重要元件之一，它的作用是解调光信号，即变换光信号为电信号。光纤通信系统对光电检波器的特性有如下要求：

(1) 在工作波长上，响应度越大越好。

响应度是表示光电检波器能量转换效率的一个参数，它可以表示为：

$$R_0 = \frac{I_P}{P_0} \quad (\text{A/W}) \quad (1.1)$$

式中 I_P 是光电检波器的平均输出电流； P_0 是入射在光电检波器光敏面上的平均光功率。响应度就是光电检波器的平均输出电流与平均输入光功率之比。单位用“安培/瓦” (A/W)。如

果用入射光子和光电检波器的发射电子表示，响应度又可以表示为：

$$R_0 = \eta e / h\Omega \quad (1.2)$$

式中 η 是光电检波器的量子效率； e 是电子电荷，等于 1.6×10^{-19} 库； $h\Omega$ 是光子能量。

响应度高，意味着光电检波器的转换效率高。例如，假设光纤通信系统的工作波长为0.85微米，光电检波器的量子效率为60%，则它的响应度为0.408 A/W，它表示了入射光功率为1瓦时，光电检波器的输出电流为0.408安培。在实际的光纤通信系统中，入射在光电检波器上的光功率是很微弱的，所以希望响应度尽可能大。

(2) 响应速度快

光电检波器对光信号脉冲的响应速度同光纤通信系统的工作码速比较要足够快。现在的光纤通信系统的工作码速不高，一般不超过数百兆毕/秒，容易满足要求。将来的光纤通信系统工作码速可达数千兆毕/秒以上，对光电检波器的响应速度要求更高。但在一般条件下，该指标是不难达到的。

(3) 噪声小

光电检波器引入的噪声越小越好。光电检波器是一个光电转换器件。输入光信号的起伏和转换为电信号后的电起伏都将在接收机输出端造成噪声。就光电检波器本身而言，产生噪声的原因是倍增过程的随机性和暗电流的起伏性。所以要求光电检波器的暗电流和表征倍增过程随机性的过剩噪声系数越小越好。

(4) 要求光电检波器的主要特性随外界环境和温度的变化尽可能小。

此外，还要求光电检波器的体积小，偏置电压或电流低。

目前,能较好地满足上述要求的器件是APD和PIN光电二极管。在0.8—0.9微米光波段,常用硅雪崩光电二极管(Si-APD),因为它在该波段有较高的响应度和较快的响应速度,很低的暗电流和较小的过剩噪声系数;而在1.0—1.6微米光波段,由于Si-APD的响应度显著降低而不能使用,目前,在该波段常用Ⅲ—V族四元素合金半导体材料制成的APD和PIN光电二极管。主要材料有GaAlAsSb, GaAlSb、InGaAsP等,后者是最常用的一种。也有人用锗雪崩光电二极管(Ge-APD),但是由于它的暗电流和过剩噪声系数都较大而不太常用。

1.2 雪崩光电二极管(APD)

在分析APD的倍增作用之前,先假设一种理想的无倍增的PIN光电二极管检波器;入射在它的光敏面上的每个光子都能产生一个电子空穴对,则在1微米光波长,该器件的响应度为0.8A/W。在后面的讨论中,我们将看到,很灵敏的光接收机的输入信号只有1毫微瓦左右的光功率,则光电检波器输出的光电流就只有十分之几毫微安,甚至更低。对这样微弱的信号电流的放大处理将会产生较大的噪声输出。因此,我们希望在电压放大之前,在光电检波器内部,利用雪崩倍增机理对微弱的信号电流进行放大,这就是APD的倍增作用。由于倍增过程的随机性,使APD光电检波器产生倍增噪声。下面对APD的倍增因子和倍增噪声进行简要的讨论。

一、APD的倍增因子

APD的工作原理如图1.2所示。它与无倍增的PIN光电二极管的主要区别是由于高偏置电压的作用,在耗尽层产生很强的电场。当电场满足下列条件,即:

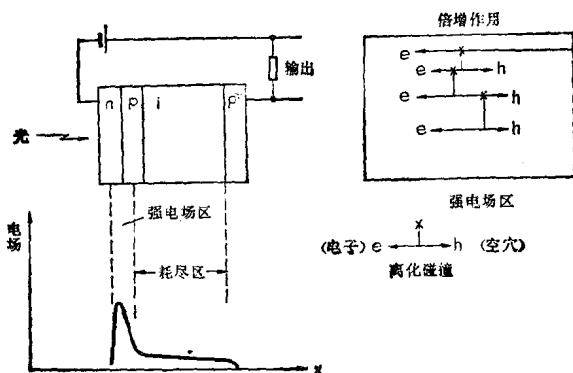


图 1.2 雪崩光电二极管的工作原理

$$\epsilon \geq 2 \times 10^5 E_g \quad (\text{Vcm}^{-1})$$

式中 E_g 是半导体材料的能隙，单位为“电子伏特”(eV)，一次电子空穴对在此强场区就可以获得足够的能量，通过碰撞离化机理产生出大量的二次电子空穴对，形成 APD 的倍增作用，使信号得到足够的放大。

APD 的响应度虽较高，但不够稳定。它随偏置电压和温度的变化而变化。响应度与偏置电压和温度之间的关系如图 1.3 所示。由图可知，在一定的温度下，APD 的响应度随偏置电压的增加而增加。当偏压接近击穿电压时，响应度急剧增加。在一般情况下，我们希望有稳定的、大小适中的响应度，即稳定的倍增因子。为达到此目的，需要对 APD 的偏压和温度进行控制。这是 APD 光电检波器的重要缺点。

下面，我们将分析 APD 的倍增因子与某些参数之间的关系。

设 APD 的平均一次电流为 I_P ，即未经倍增的电流。倍增后 APD 的平均输出电流 I_0 可以用下列公式表示：

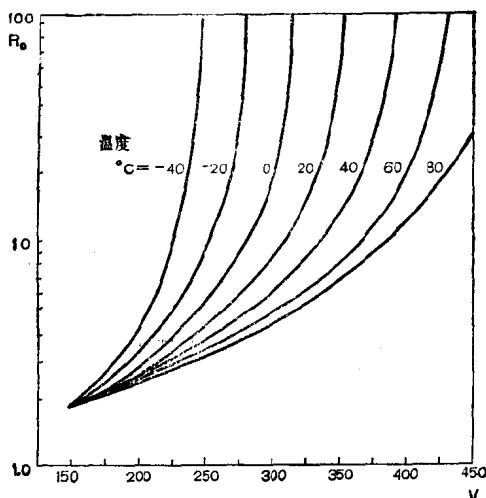


图 1-3 响应度与偏置电压的关系

$$I_0 = \frac{I_p}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (1.3)$$

式中 n 为常数，与制造APD的材料，掺杂分布和工作波长有关，一般取 $3 \sim 6$ ； V_B 是APD的击穿电压。式(1.3)就是所谓“米勒公式”。APD的平均倍增因子可以用下列公式表示：

$$\langle g \rangle = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (1.4)$$

考虑到APD的内阻 r ，上式可以变成为：

$$\langle g \rangle = \frac{1}{1 - \left(\frac{V - I_0 r}{V_B}\right)^n} \quad (1.5)$$

式中符号“ $\langle \rangle$ ”表示统计平均，下同。

由上式可见, 当 V 接近于 V_B 时, 因为 $I_0 r$ 很小, 所以, $\langle g \rangle$ 趋近于无穷大。将上式进行简单的数学处理就可以得到 APD 的最大倍增因子为:

$$\langle g \rangle_{\max} = \sqrt{\frac{V_B}{nr I_p}} \quad (1.6)$$

由上式可见, 当 APD 的击穿电压较大, 入射光功率较小时, APD 有较大的倍增因子。

二、APD 的倍增噪声

APD 的倍增过程可以用图 1.4 表示。光信号功率 $P(t)$ 入射

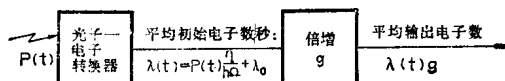


图 1.4 APD 的倍增过程

在 APD 的光敏面上, 部分光子将激发出一次电子空穴对。每秒钟产生的一次电子空穴对平均数可以表示为:

$$\lambda(t) = \frac{\eta}{h\Omega} P(t) + \lambda_0 \quad (1.7)$$

式中 λ_0 是暗电流每秒钟的平均电子数。另一方面, 由于入射光信号脉冲的光量子起伏, 使得在任意时间间隔内所产生的一次电子空穴对的总数是一个随机变量。同时, 一次电子空穴对倍增后所产生的二次电子空穴对数 (包括一次电子空穴对在内) 也是一个随机变量, 因而产生倍增噪声。由此可见, APD 的倍增噪声是一个复杂的函数关系, 它与 APD 的类型、空穴和电子的离化率等有关, 所以它的概率分布也十分复杂。这里仅介绍与倍增噪声有关的几个结论。

(1) APD 倍增噪声的双边功率谱密度为:

$$\frac{dN_g}{df} = eI_P \langle g^2 \rangle \quad (1.8)$$

(2) APD倍增因子的均方值为

$$\langle g^2 \rangle = F(\langle g \rangle) \langle g \rangle^2 \quad (1.9)$$

式中 $F(\langle g \rangle)$ 称APD的过剩噪声系数，它可以表示为：

$$F(\langle g \rangle) = \langle g \rangle \left[1 - (1 - K_e) \left(\frac{\langle g \rangle - 1}{\langle g \rangle} \right)^2 \right] \quad (1.10)$$

式中 $K_e = \beta_p / \alpha_e$ ，称APD的有效电离率比， β_p 是空穴碰撞电离率， α_e 是电子碰撞电离率。

对于理想的倍增机理， $F(\langle g \rangle) = 1$ ，但实际上是不可能的。 $F(\langle g \rangle)$ 与 $\langle g \rangle$ 和 K_e 的关系如图1.5所示。对于高质量的Si-APD， K_e 在0.02~0.03之间。为了简化计算，我们用下列近似公式：

$$\langle g^2 \rangle \approx \langle g \rangle^{2+x} \quad (1.11)$$

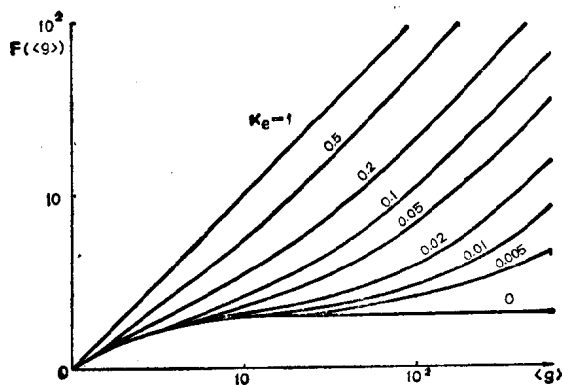


图 1.5 APD过剩噪声系数与倍增因子的关系

式中 x 是APD的过剩噪声指数。上式的意义就是用简单的 $\langle g \rangle^x$

代替复杂的 $F(\langle g \rangle)$ 。

关于过剩噪声系数的物理意义，我们可以理解为由于倍增作用而增加的一个噪声系数。APD的倍增作用对于信号功率放大 $\langle g \rangle^2$ 倍，而对于噪声功率却放大 $\langle g \rangle^{2+x}$ 倍，即比信号多放大 $\langle g \rangle^x$ 倍。理想情况是 $x=0$ ， $\langle g \rangle^x=1$ ，实际上 x 不可能等于0。 x 值与APD的制造工艺和材料有关。对于Si—APD， x 在0.3—0.5之间；对于Ge—APD， x 在0.8—1.0之间；对于InGaAsP—APD， x 在0.5—0.7之间。

为了进一步理解 $\langle g \rangle^x$ 的意义，举一个实际例子加以说明。

设 $\langle g \rangle = 100$ ， $x = 0.5$ ，则过剩噪声系数为： $\langle g \rangle^x = 100^{0.5} = 10$ 。这表明：APD光电检波器使信号功率放大 10^4 倍，而使噪声功率放大 10^5 倍。如果 $x = 1$ ，则噪声功率放大 10^6 倍。可见当 $x = 1$ 时，这种噪声的影响很大。所以，在1.0—1.6微米波段，一般不用 x 值较大的Ge—APD作光电检波器，而用 x 值较小的Ⅲ—V族四元素合金半导体材料。

三、APD的响应时间

APD的响应时间由以下两个因素决定：（1）载流子通过强场区的渡越时间。（2），外部负载电路参数。由外部电路参数所产生的限制可用如图1.6所示的等效电路来估计。仅用负载电阻 R_L 表示放大器。该电路的特性很像一个简单的低通滤波器，它的通频带可以表示为：

$$B = \frac{1}{2\pi R_L C_d} \quad (1.12)$$

式中 R_L 是负载电阻和APD的串联电阻之和； C_d 是APD的结电容，包括安装电容。

严格地说，APD光电检波器的渡越响应与RC电路不同，