光纤通信

电子科技大学

光电信息学院 光纤通信课程组

第四章 光纤通信系统原理

学习内容

4.1 光发射机

4.2 光接收机

4.3 光纤通信系统的设计

4.1 光发射机

直接调制　　外调制

受调制的光源特性参数:

功率、幅度、频率和相位

广泛应用:直接光强（功率）调制

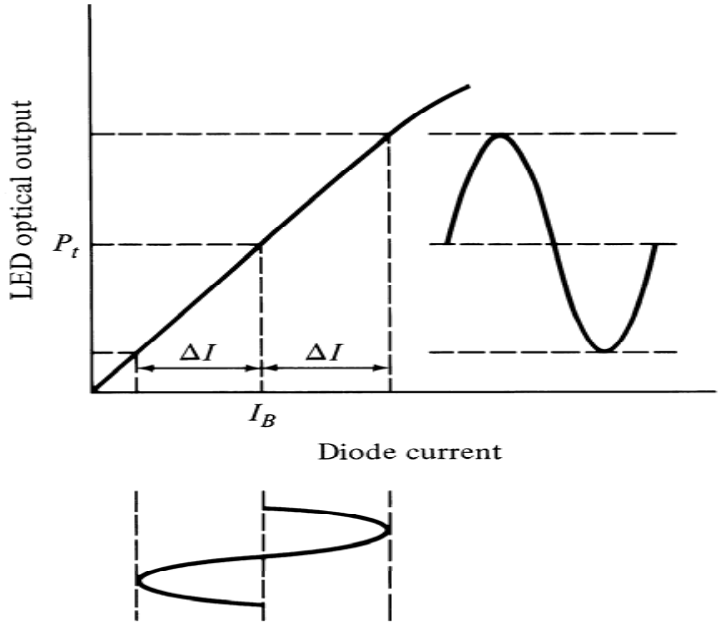
直接调制

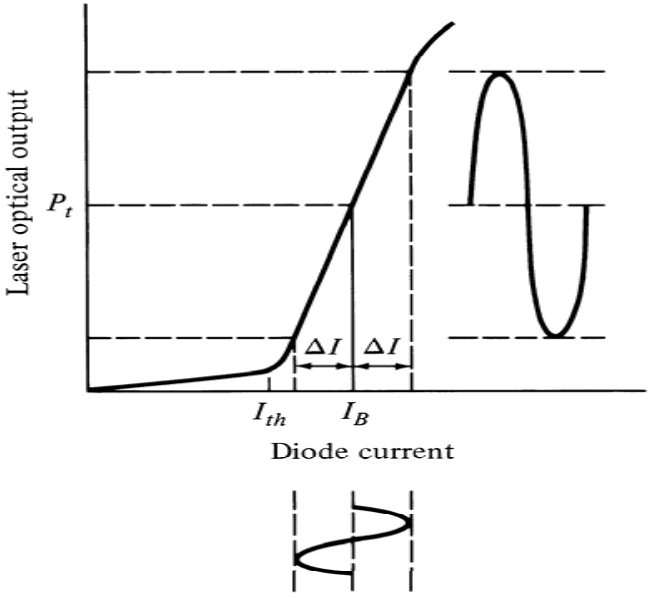
- 直接调制:调制信号直接作用在光源上，把要传送的信息转变为电源信号注入到LD或LED，获得相应的光信号。光源的发光强度调制(IM)。
- 直接调制优点:简单、经济、容易实现等

光纤通信系统中广泛采用的调制方式。

- 调制信号的形式:光源的直接调制又可分为*模拟信号调制*和*数字信号调制*

直接光强数字调制的工作原理





对LD施加了偏置电流Ib，由图可见，当激光器的驱动电流大于阈值电流Ith时，输出光功率P和驱动电流I基本上是线性关系，输出光功利和输入电流成正比，所以输出光信号反映输入电信号。

LD调制特性

- (1) 电光延迟
- (2) 张驰振荡
- (3) 小信号输入的频率响应
- (4) 频率啁啾

- 光源内调制的优点是电路简单容易实现，但是，在高码速下将使光源的性能变坏，因此需要对光源的外调制方式。
- 目前使用的外调制方式有：
- (1) 电光调制
- (2) 声光调制
- (3) 磁光调制

光发射机的构成

光发送机的构成:

输入接口

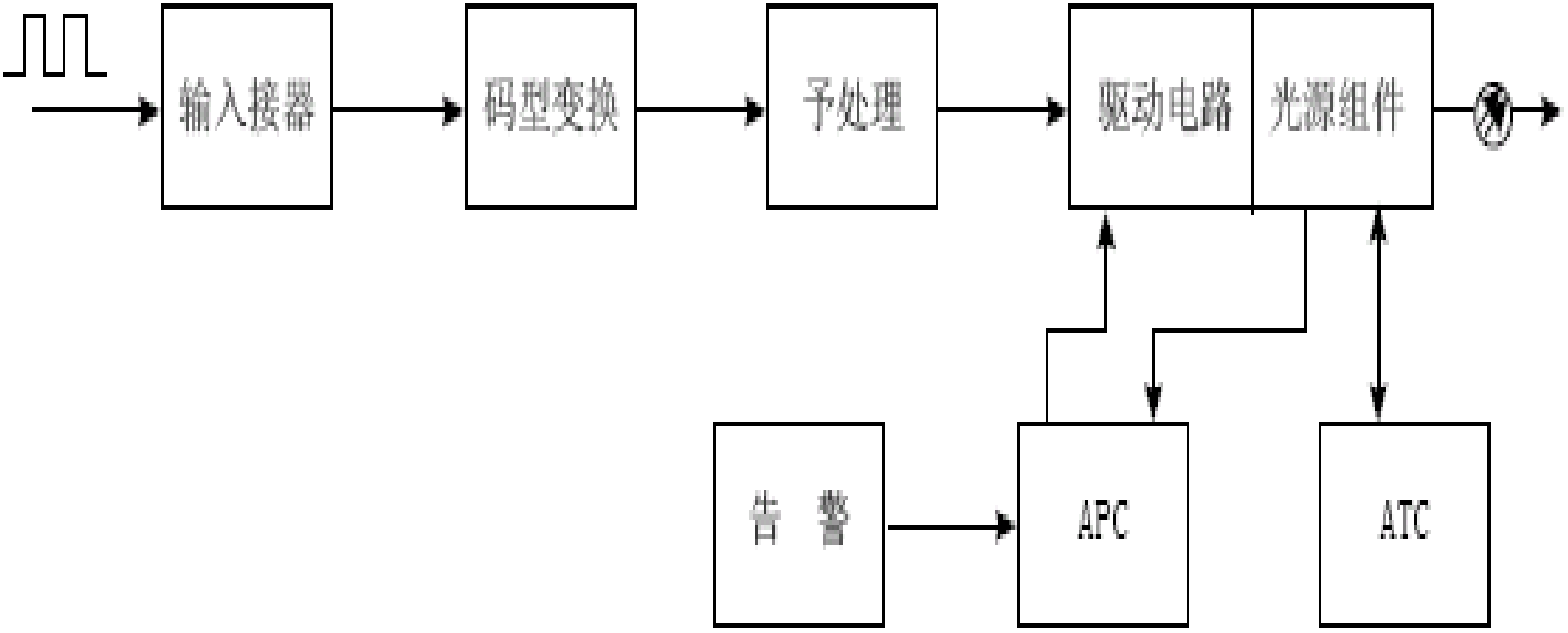
光源

驱动电路

监控电路

控制电路等构成　　核心:光源及驱动电路

光发射机(数字)框图

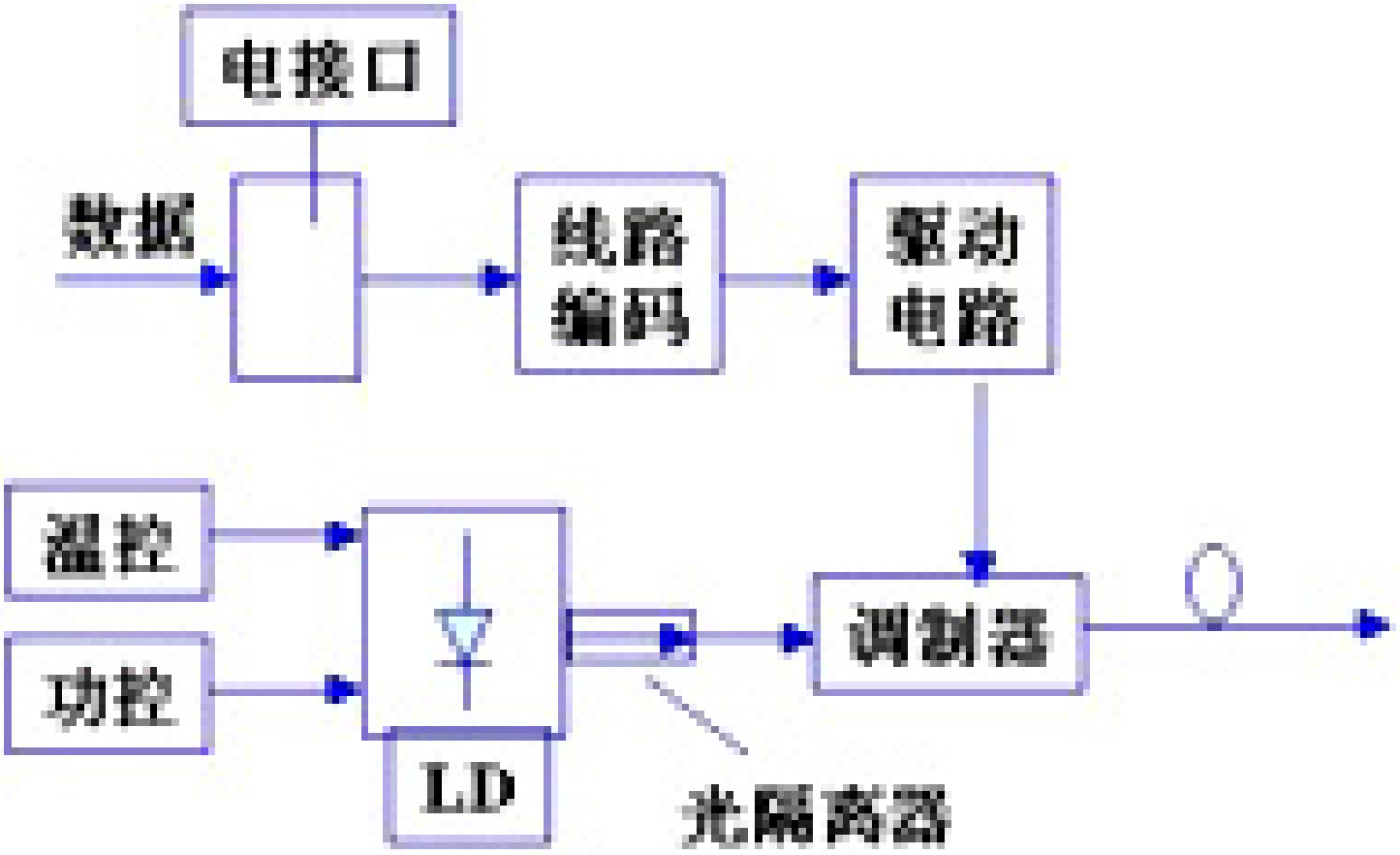


对光发射机性能的要求

- 光发射机的作用是把电端机送来的电信号变为光信号送入光纤中传输。
- 包括以下方面：
- (1)光源特性
- (2)调制特性
- (3)输出特性

数字光发射机

数字光发射机框图



数字光发射机对光源的要求

系统对光源的要求是很高的，包括：

1．波长稳定性要求：WDM系统对光源发射波长的稳定性具有较高的要求，波长的漂移将导致信道之间的串扰。

2．功率稳定性要求：某信道功率的漂移，不仅影响本信道的传输性能，而且通过EDFA的瞬态效应影响其它信道的性能。

（调制速率、谱线宽度）

数字光发射机设计原则

数字光发射机核心:光源和电路

光源:实现电/光转换的关键器件，在很大程度上决定着光发射机的性能。

电路:其设计应以光源为依据，使输出光信号准确反映电信号。

光发射机的控制电路（辅助电路）

光源的控制电路:温度控制（ATC）和功率控制（APC）电路，它们的作用:消除温度变化和器件老化的影响,稳定发射机性能。

其它的控制电路:光源慢启动保护电路、激光器反向冲击电流保护电路、激光器过流保护电路和激光器关断电路。

光发射机的调制电路（主要电路）

光源注入合适的偏置电流和调制电流就能发射光，也就是说可以通过直接调制电流信号从而调制光信号，这也就是直接调制名称的由来。

在发射机中是由驱动电路完成的提供恒定的偏置电流和调制电流，并采用一定的机制保持光功率不变。

驱动电路由调制电路和控制电路两部分组成。调制电路为主要电路。

光发射机的线路编码电路

线路编码：又称信道编码，之所以必要，是因为电端机输出的数字信号是适合电缆传输的双极性码，而光源不能发射负脉冲，所以要变化为适合于光纤传输的单极性码，此外它可以消除或减少数字电信号中的直流和低频分量，以便于在光纤中传输、接收及监测。

定时信息

大体可归纳为三类：

扰码二进制、字变换码、插入型码。

线路编码

在PDH通信时代，线路码型可以说是种类繁多、五花八门，但归根结底可以分为三大类，当然每一类码型中又可分为许多种。这三大类就是：

- 扰码二进制
- mBnB码
- 插入比特码

扰码二进制

发送端用扰码器对数字电信号码流进行扰码，打乱原来的排列顺序以形成新的码流来调制光发送机，而在接收端进行反扰码以恢复原来的码流。

优点：实现简单；能比较有效地抑制长连“0”和平衡码流；由于不增加码率所以光功率代价为0(码率增加会使灵敏度降低)。

缺点：由于码率没有增加，难以实现误码检测、公务联络等功能。

在PDH 通信中很少采用这种线路码型；但在SDH通信中却全部采用此种码

光发射机的电路（实现）

驱动电路

自动功率控制电路

自动温度控制电路

告警电路和保护电路

驱动电路

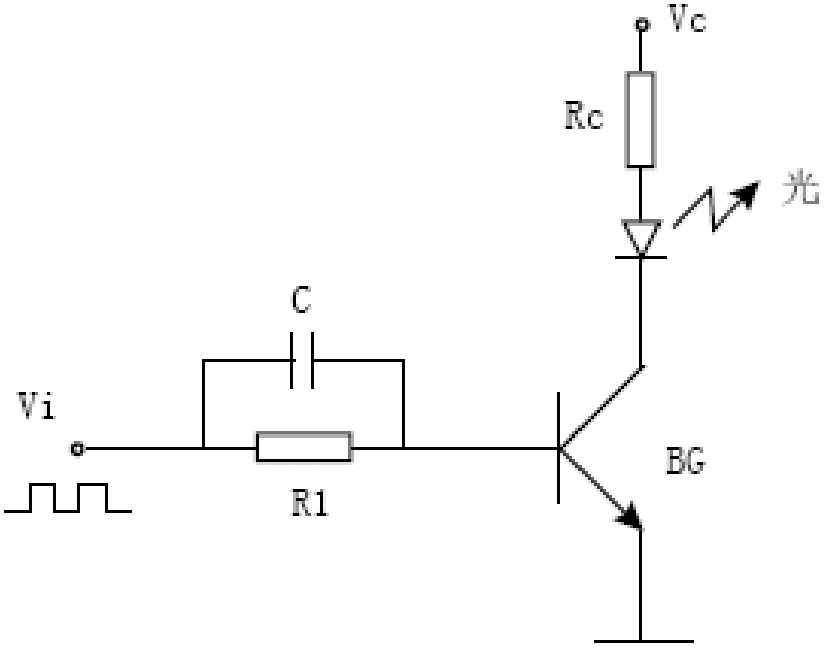
驱动电路作用:将电功率转换成光功率，并将要传输的电信号调制到光源的输出上。

LED的驱动电路比较简单，而LD的驱动电路相当的复杂。

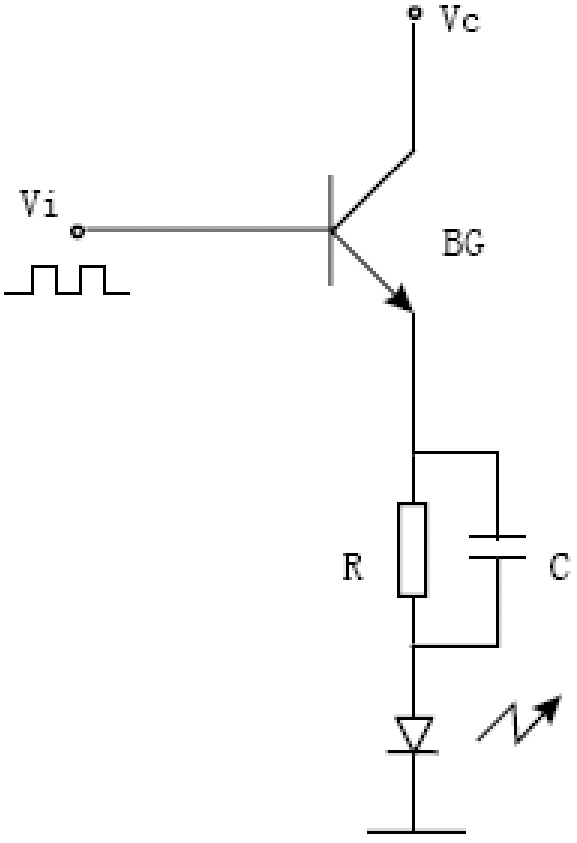
驱动电路应该能对光源同时提供偏置电流和随信号而变化的调制电流。

大多数光纤通信系统采用数字调制方式。模拟驱动电路:保证光源的输出光功率随信号电压的幅度、相位成线性地变化。

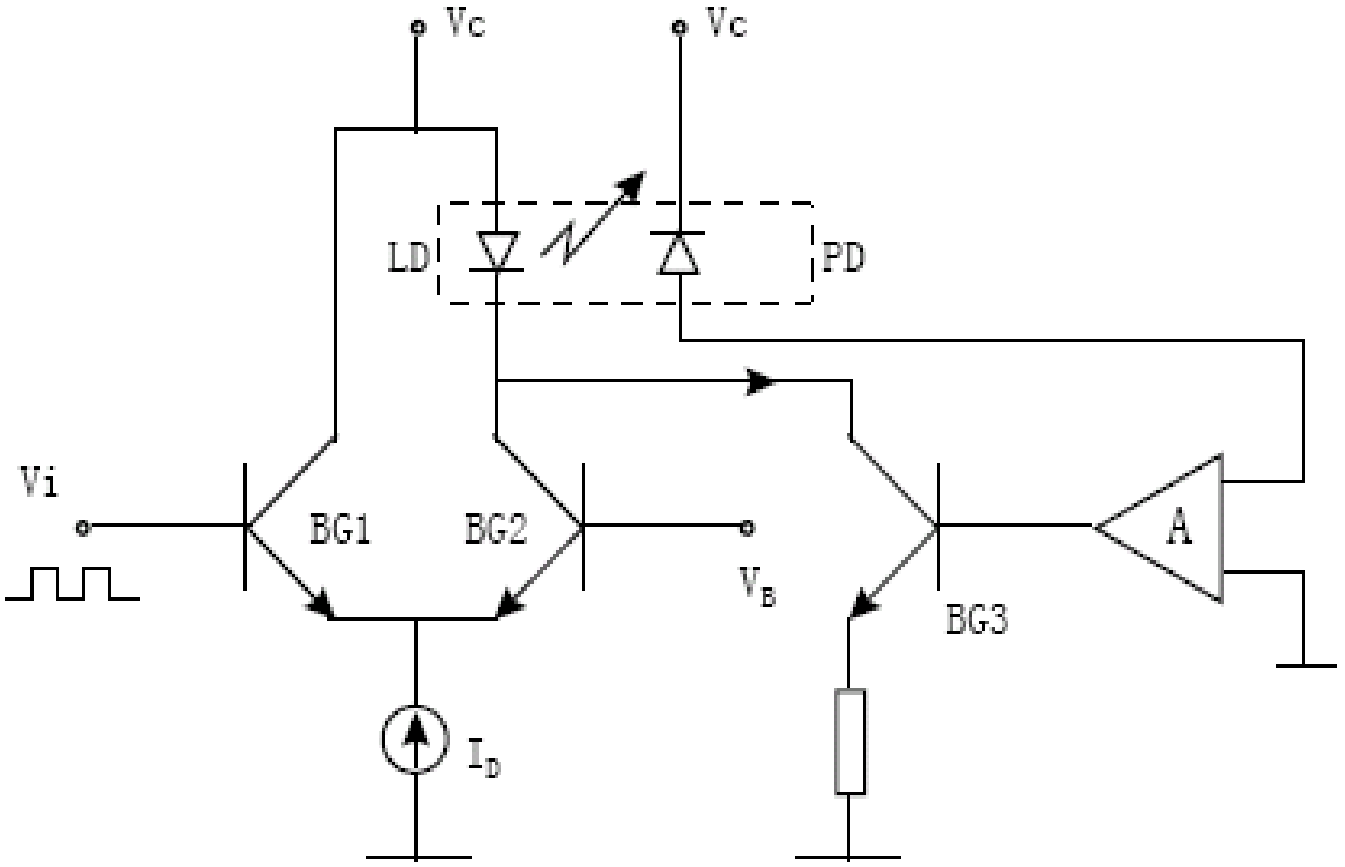
实现之一：共射极驱动电路



实现之二:射随驱动电路



实现之三:射极耦合驱动电路

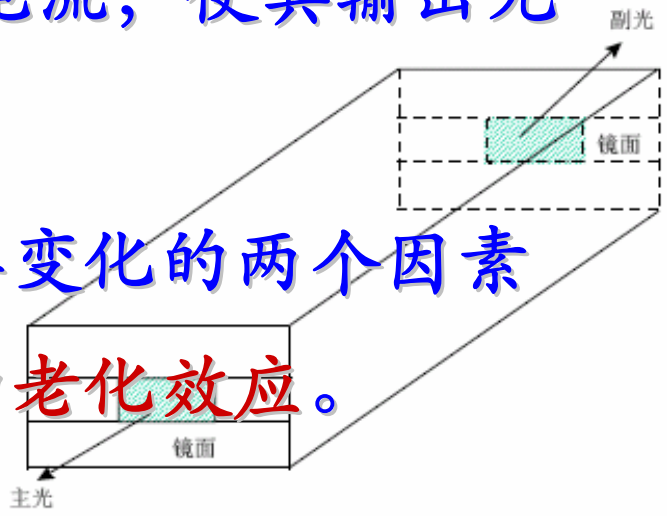


自动功率控制电路

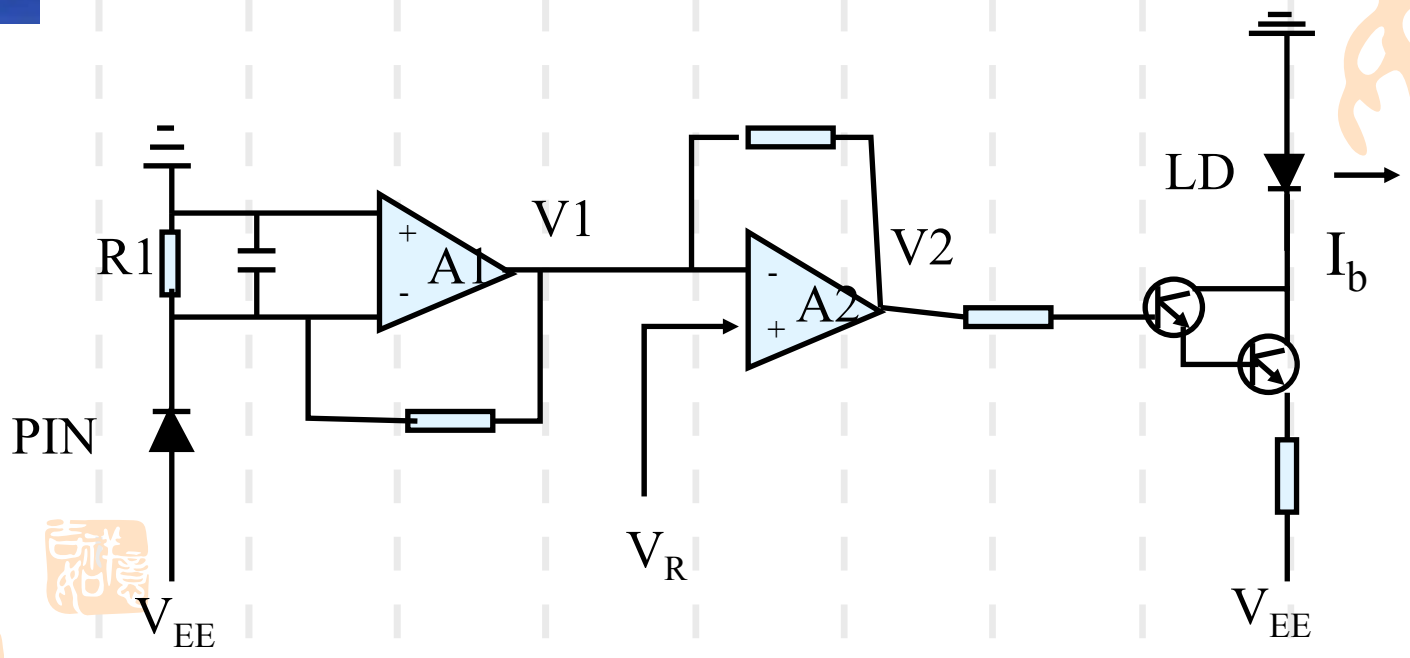
目的:稳定激光器的输出功率，需要在发射机中具有自动功率控制（APC）电路。

机理：APC电路一般利用一只与LD封装在一起的PIN监测LD后向输出的光，根据PIN输出的大小而自动地改变对LD的偏置电流，使其输出光功率保持恒定。

可能引起激光器输出功率变化的两个因素是芯片温度的变化和激光器的老化效应。



自动功率控制电路



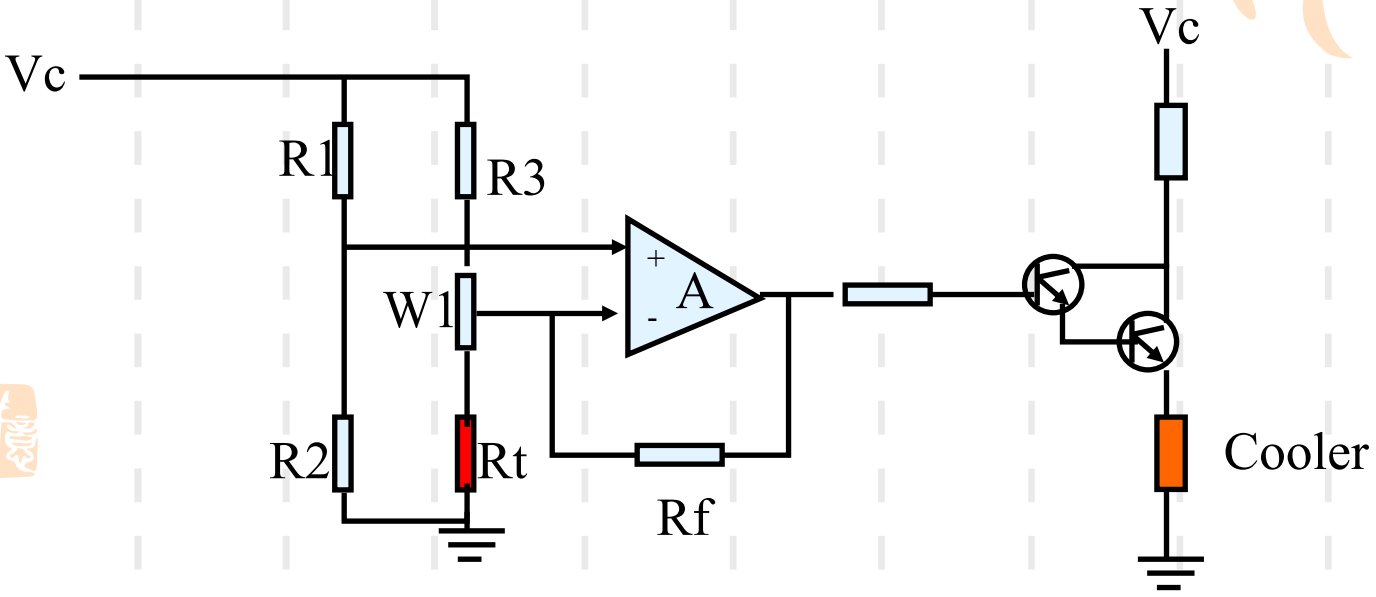
APC自动光功率控制电路和偏置电路

自动温度控制电路

半导体激光器的输出特性受温度影响很大，当温度发生变化时，LD的P-I特性和光谱特性都要发生变化，因此在光发射机中需要自动温度控制（ATC）电路以保证激光器在恒定温度下工作。

一般说来，在实用化的半导体激光器封装中，都带有一个半导体致冷器和一只能够监测激光器芯片温度变化的热敏电阻。

自动温度控制电路



ATC自动光功率控制电路

告警电路和保护电路

无光告警、寿命告警电路等

保护电路（缓启动，限流）

数字光发射机的性能指标

1、平均发送光功率

平均发送光功率是发送机耦合到光纤的伪随机数据序列的平均功率在光发送机的输出端值。

发送机发送的光功率与传送的数据信号中“1”所占的比例有关，“1”越多发送光功率越大。当传送的数据信号是伪随机序列时，“1”和“0”大致各占一半，将这种情况下的光功率定义为平均发送光功率。通常光发送机的发送功率要有1~1.5dB的余量。

2、消光比EXT

消光比是最坏反射条件时，全调制条件下，发射光信号平均光功率与不发射光信号平均光功率的比值。用公式表示为（dB）

$$EX=10\log_{10}(A/B)$$

其中A为传号时的平均光功率，B代表空号时的平均光功率（噪声）。激光器正常工作时设置的偏置电流略小于阈值电流，以便缩短光源的导通时间，这样即使在空号时仍有相当的发光功率，消光比不可能无穷大。

光发送机的消光比一般要求大于**8.2dB**，即**“0”**码光脉冲功率是**“1”**码光脉冲功率的七分之一。

3、边模抑制比SMSR

SMSR 的定义为：在全调制的条件下主纵模的光功率M1 和最大边模光功率M2 之比。即

$$SMSR=10lg(M1/M2)$$

一般规定光发送机的SMSR 大于30dB，即主纵模的光功率是最大边模光功率的1000 倍以上。

4、谱宽

即光发送机中所用光源器件的谱线宽度。

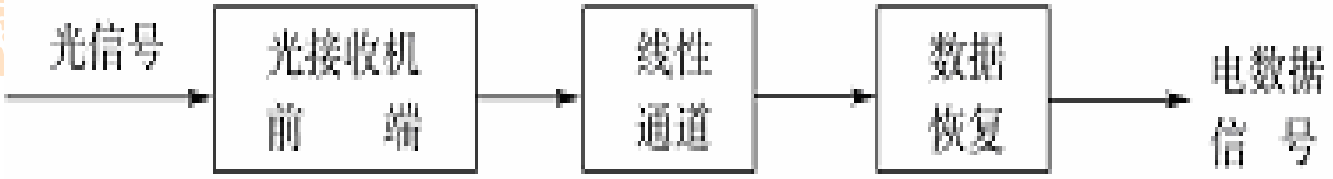
光源器件的谱宽越窄越好，因为谱宽越窄，由它引起的光纤色散就越小，就越利于进行大容量的传输。

4.2 光接收机

光接收机的组成

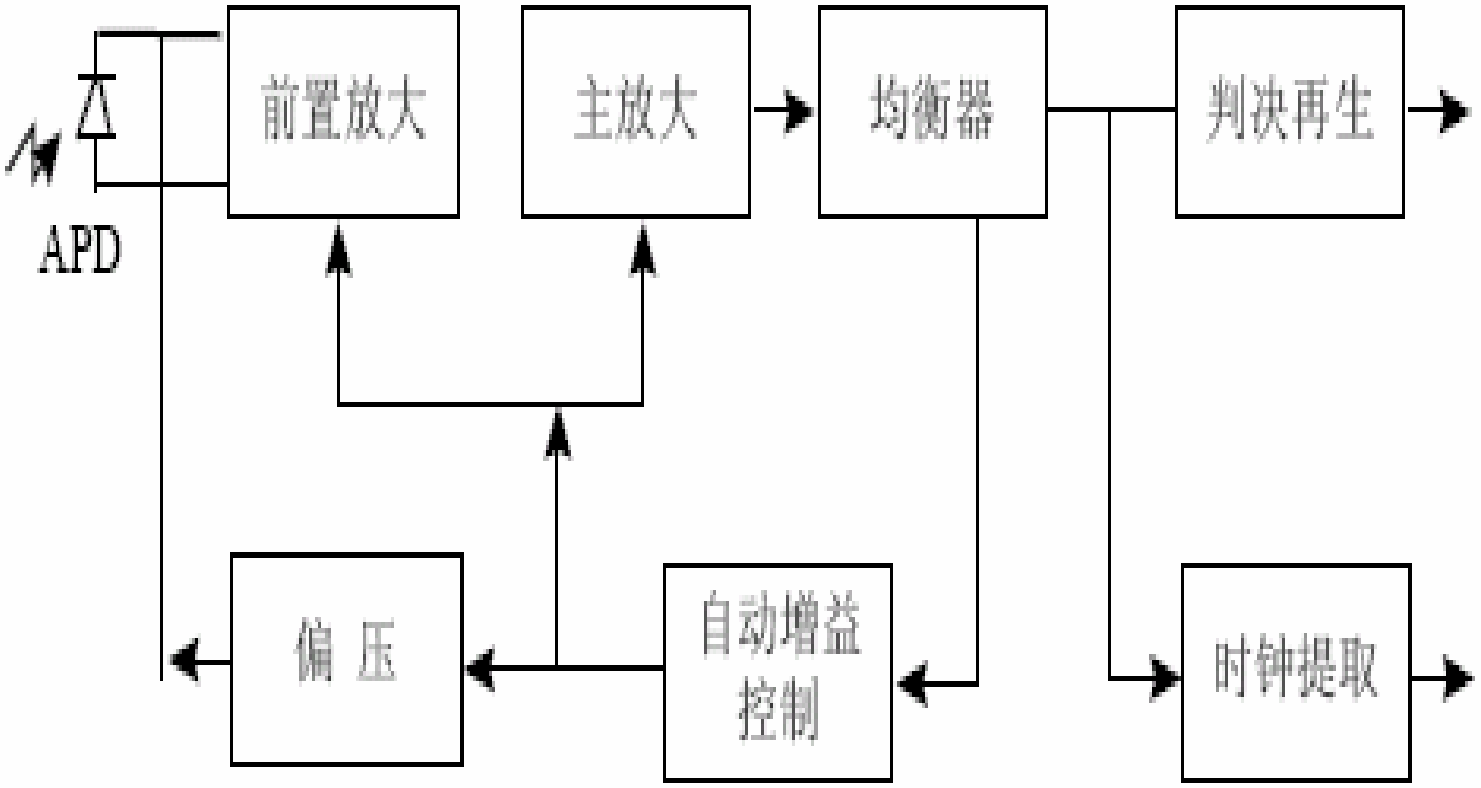
- 作用：把接收来的光信号转变为原来的电信号，它的性能的优劣直接影响整个光纤通信系统的性能。
- 光纤通信系统有模拟和数字两大类，光接收机也相应的有两大类，即模拟接收机和数字接收机。

- 直接检测数字光纤通信接收机一般由三个部分组成，即光接收机的前端、线性通道和数据恢复。



直接检测数字光纤通信接收机

数字光接收机框图



数字光接收机 主要由接收电路和判决电路两大部分组成。

接收电路由光电检测器和前置放大器、均衡器、主放大器、偏置电路和自动增益控制电路五部分组成。

判决电路由判决器、时钟恢复电路和译码器组成。

光接收机从接收信号到恢复原来的电信号输出的工作过程……

光电检测器：把外来光信号转换成电信号送入到前置放大器，这一级的噪声对整个电信号的放大影响甚大，设计时要严格选择方案。

主放大器：提供足够增益，将信号放大到判决电路所需要的电平；同时放大器增益受到AGC电路的控制，使输出信号的幅度在一定范围内不受输入信号的影响。

均衡器：保证均衡以后的波形有利于判决，尽量减小码间干扰。

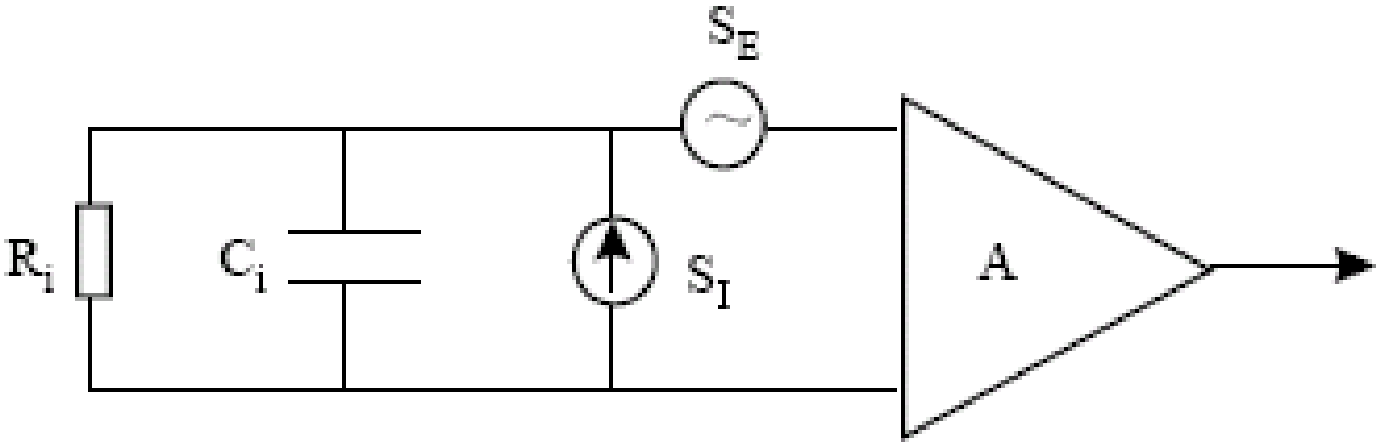
判决器和时钟恢复电路：对信号进行再生，并用译码器对信号译码，使信号恢复到和光端机输入的电信号一样。

光接收机前端

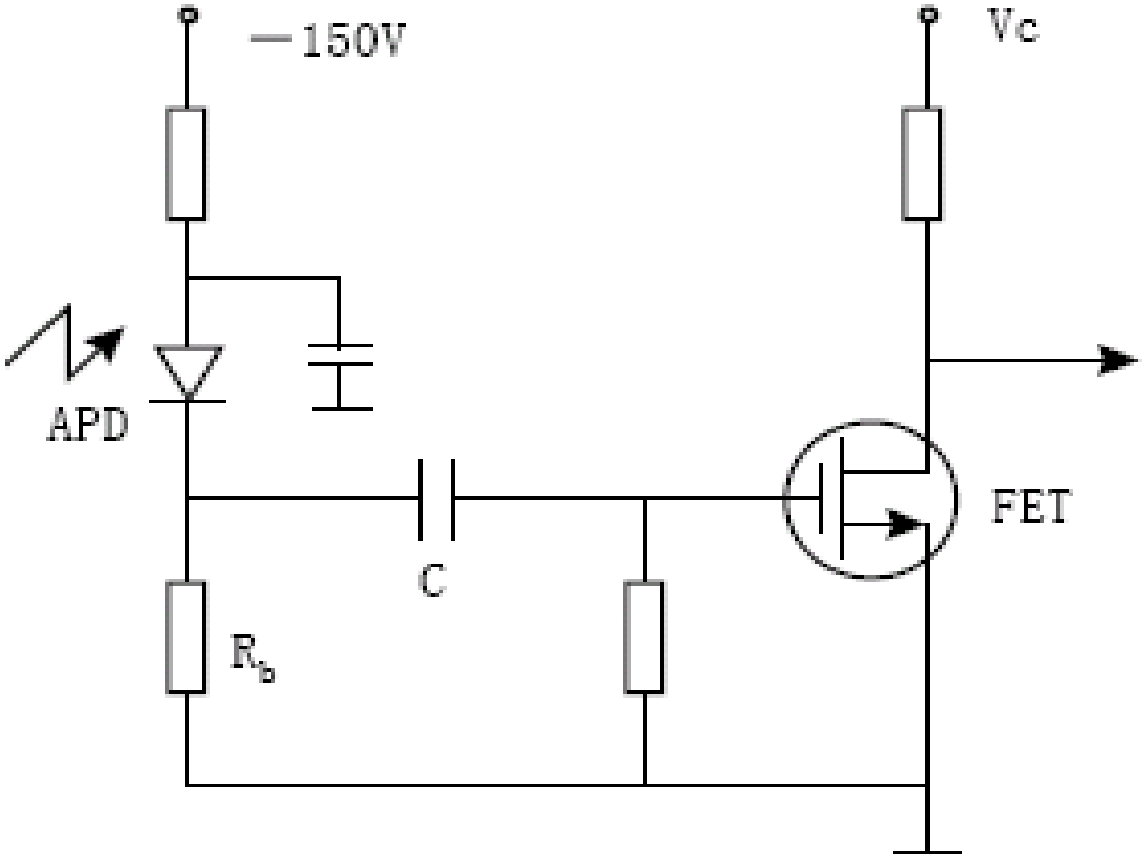
- 光接收机前端作用：将光纤线路末端耦合到光电检测器的光比特流转变为时变电流，然后进行预放大，以便后一级进一步处理。
- (1) 光电检测器
- 一般采用PIN光电二极管或APD雪崩光电二极管，它们性能的优劣直接影响整个光接收机的性能
- (2) 前置放大器
- 光电检测器输出的光电流是十分微弱的，需要多级放大器进行放大，多级放大器的前级为前置放大器。

- 一台性能优良的光接收机，应具有无失真地检测和恢复微弱信号的能力，这首先要求其前端应有低噪声，高灵敏度和足够的带宽。
- 根据不同的应用要求，前端的设计有三种不同的方案:
- (1)低阻抗前端
- (2)高阻抗前端
- (3)跨(互)阻抗前端

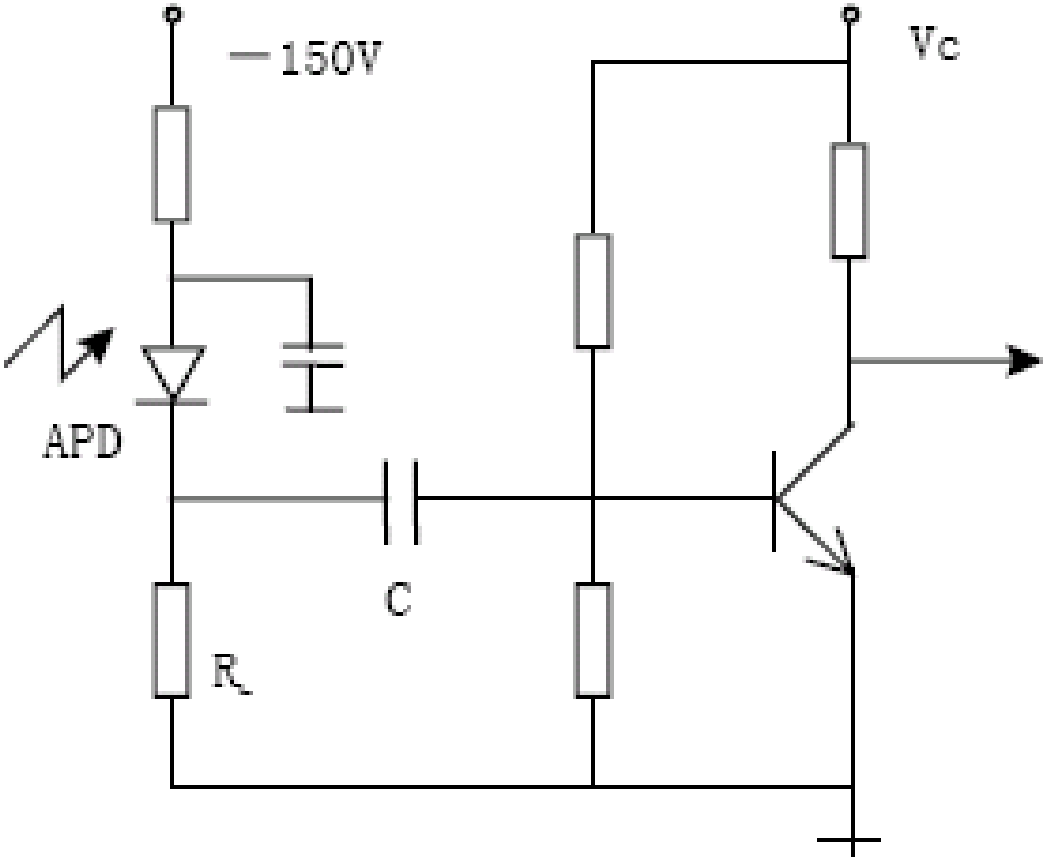
前置放大器的等效电路



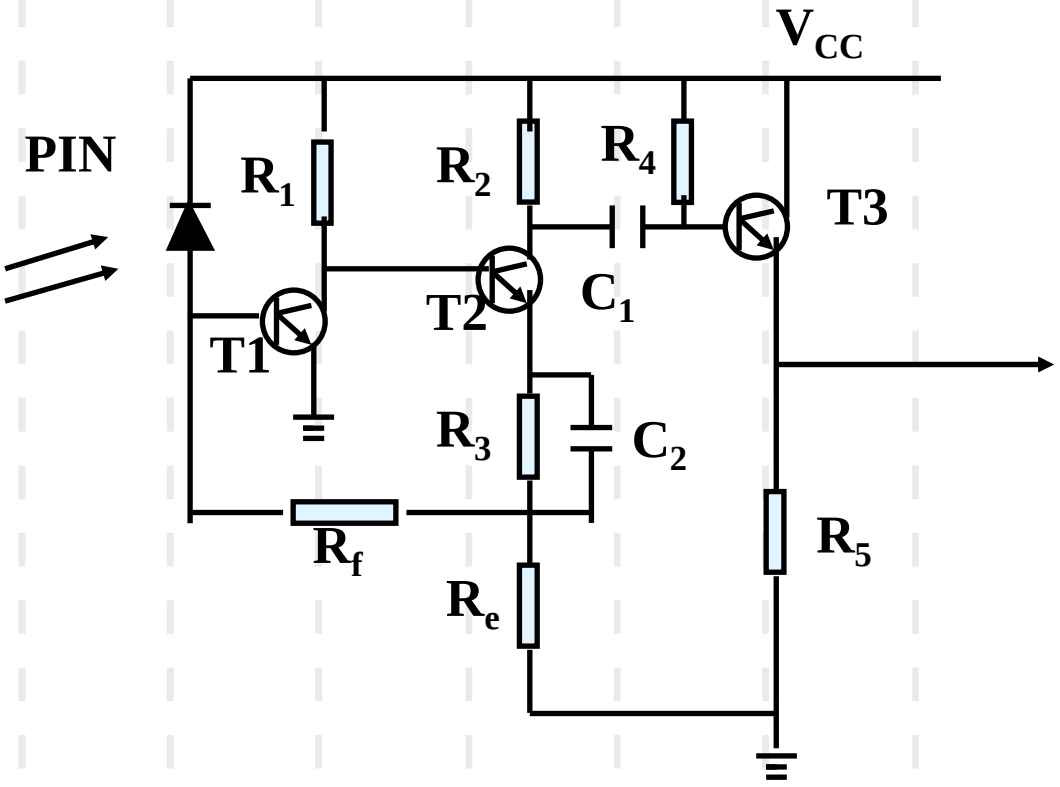
FET放大器



双极性晶体管放大器



跨阻抗放大器



线性能道

- 光接收机的线性通道：由一个高增益的主放大器和一个均衡滤波器组成，此外，还应包括峰值检测和自动增益控制(AGC)电路，用来控制放大器增益。

主放大器的作用

- ① 将前置放大器输出的信号放大到判决电路所需要的信号电平。
- ② 它还是一个增益可调节的放大器，当光电检测器输出的信号出现起伏时，通过光接收机的自动增益控制电路对主放大器的增益进行调整，以使主放大器的输出信号幅度在一定范围不受输入信号的影响，一般主放大器的峰-峰值输出是几伏数量级。对于APD的光接收机还通过控制APD的偏压来控制雪崩倍增管的雪崩增益。

均衡滤波器

- 作用：均衡波形有利判决。均衡滤波器是必不可少的。
- ① 没有均衡滤波器将出现这些现象
- 将会使前、后码元的波形重叠，产生码间干扰，严重时造成判决电路误判，产生误码。
- ② 有均衡滤波器的波形
- 均衡滤波器是使经过均衡器以后的波形成为有利于判决的波形。例如，成为升余弦频谱脉冲。

均衡滤波器：

使经过均衡器以后的波形成为有利于判决的波形。

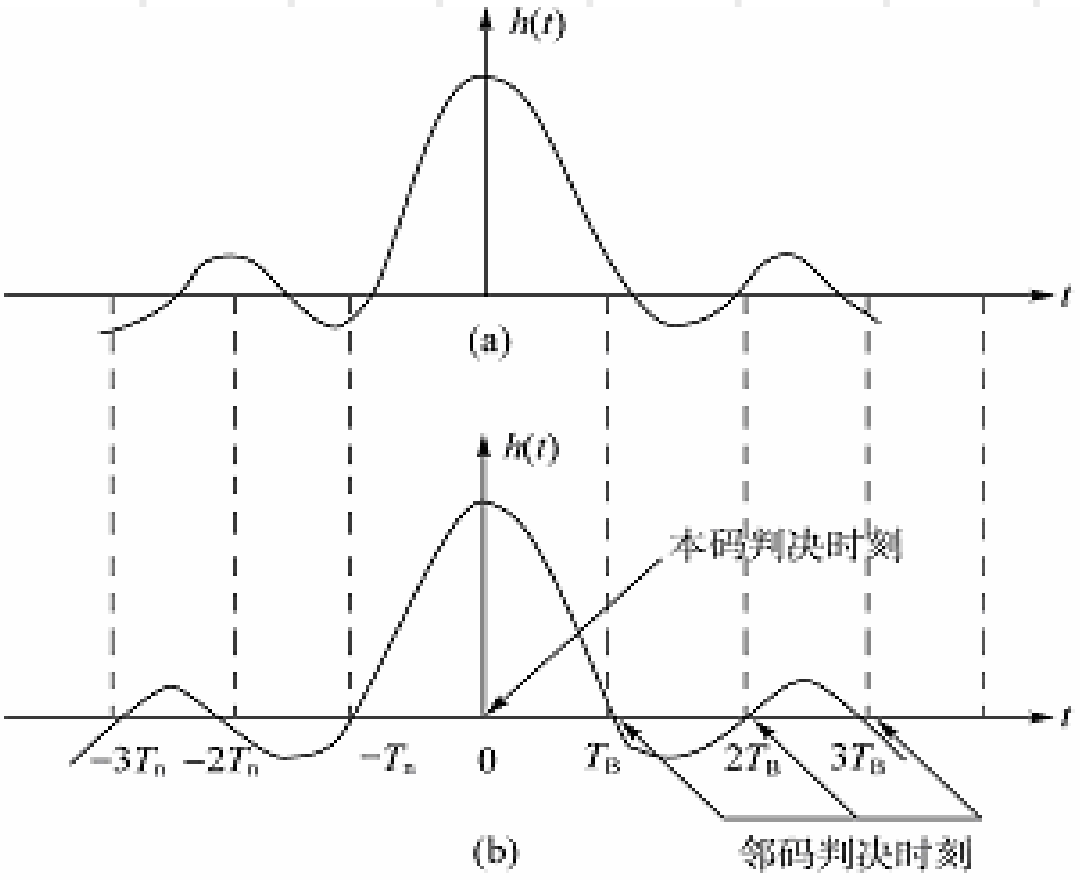


图 均衡滤波器的作用

数据恢复

- 数据恢复电路由判决电路和时钟恢复电路组成，如果需要与电端机接口，还需要解码、解扰和编码电路
- 判决电路和时钟恢复电路的任务是把线性通道输出的升余弦波形恢复成数字信号。

辅助电路

- 光接收机还有一些辅助电路，如：

- (1)钳位电路。
- (2)温度补偿电路。
- (3)告警电路。

集成光接收机

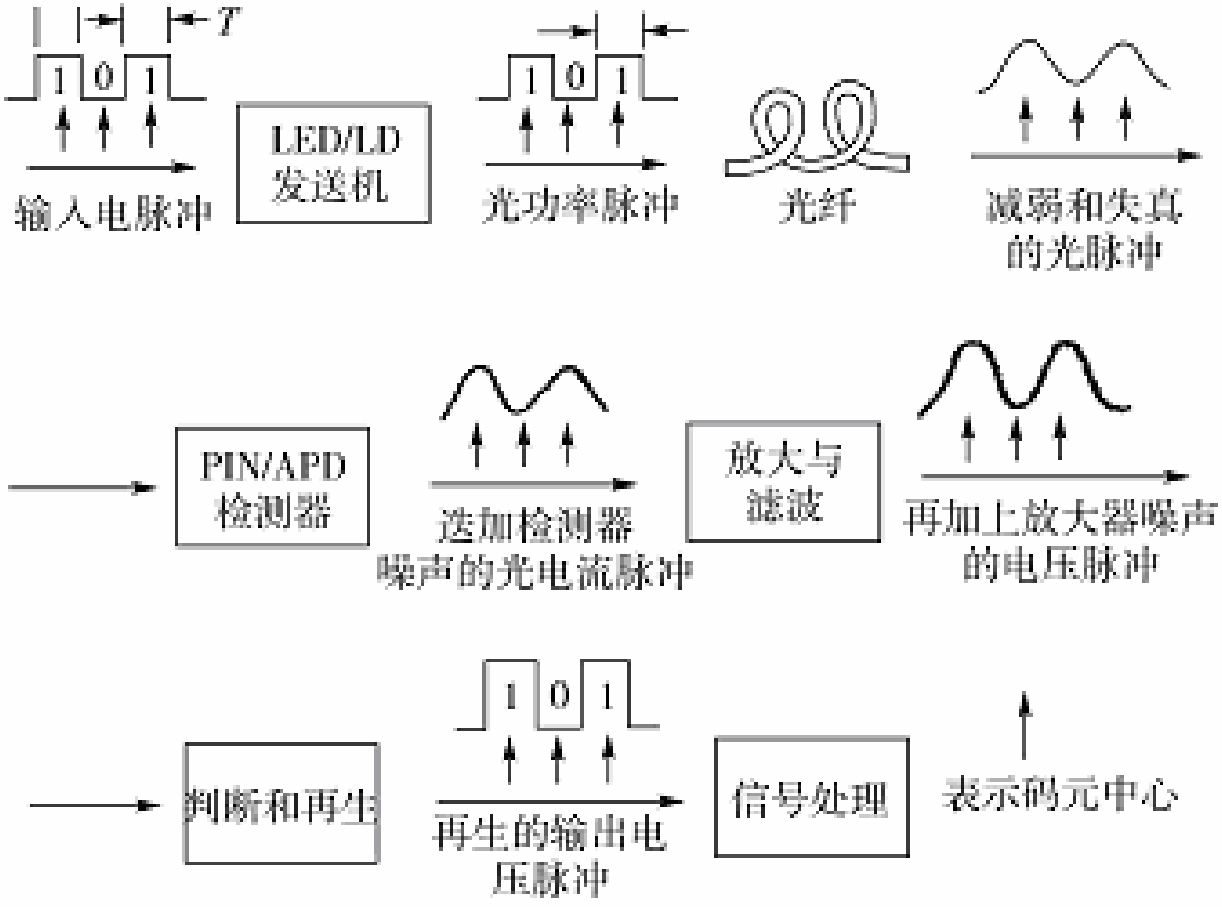
- 光接收机的组成部件，除了光电二极管外，都是标准的电子元器件，采用标准集成电路(IC)工艺技术，很容易集成在同一芯片上，做成集成光接收机。
- 在高比特工作时，这种集成光接收机具有很多优点。90年代末用Si和GaAs集成电路工艺已制成带宽超过2GHz的集成光接收机，现在带宽超过10GHz的集成光接收机也已用于光波实验系统。

光接收机噪声分析

数字光纤通信系统的信号变换特点

- 在数字光纤通信系统中，传输的是由“0”和“1”组成的二进制光脉冲信号，这是一种单极性码，即光功率在“接通”(“1”码)和“断开”(“0”码)两个电平上变动。
- 按照“1”码时码元周期T的大小，分为归零码(RZ码)与非归零码(NRZ码)两种。

系统中数字脉冲传输过程的变换



系统中数字脉冲传输过程的变换

光接收机的噪声源

- 光接收机的噪声是与信息无关的随机变化量，噪声源从引入过程来分，可分为两类，即与信号光电检测器有关的噪声和与光电接收机电路有关的噪声。
- 与信号光电检测器有关的噪声包括：量子噪声、雪崩倍增噪声、暗电流及漏电流噪声和背景噪声等等。
- 与光接收机电路有关的噪声包括：放大器噪声、负载电阻热噪声等。

噪声的评价方法

- 噪声是一种随机性的起伏量，是电信号中不需要的成分，它干扰实际系统中信号的传输和处理，影响和限制了系统的性能。

- (1)噪声的大小可以用均方值来表示
- (2)信噪比(SNR)

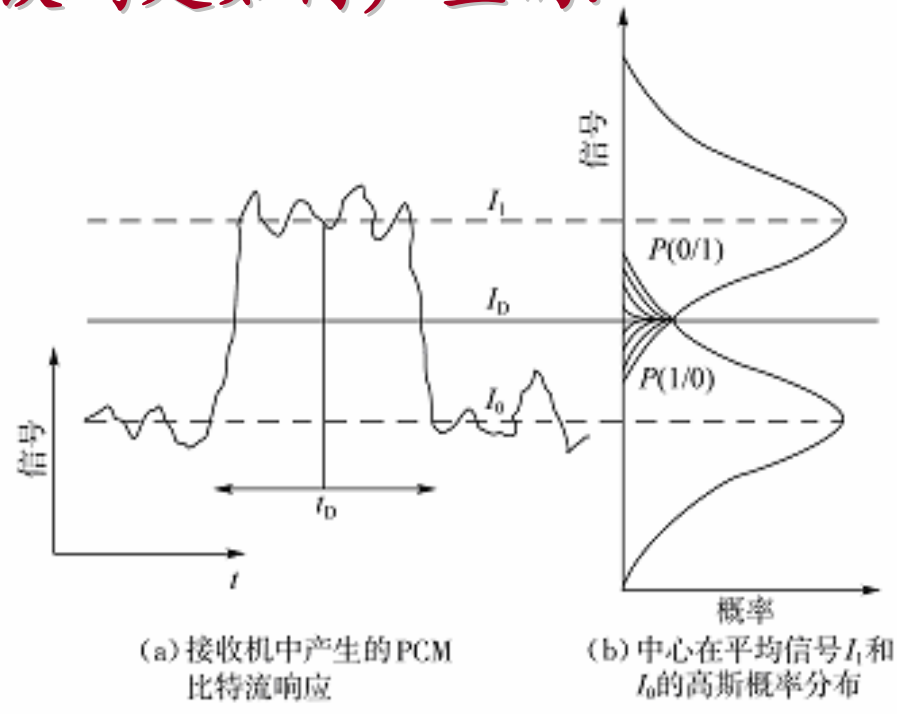
SNR=平均信号功率/噪声功率

误码率和接收灵敏度

- 光接收机的误码率和灵敏度是描述光接收机准确检测光信号能力的性能指标。

光接收机的误码率

- 光接收机的误码率BER定义为：
- BER=错误接收的码元数/传输的码元总数
- 那么光接收机的误码是如何产生的?



(a) 接收机中产生的PCM比特流响应　　(b) 中心在平均信号I_1和I_0的高斯概率分布

光接收机的判决

- 若$I > I_D$，采样值为“1”，若$I < I_D$，采样值则为“0”。
- 如果传输的信码为“1”，可是$I < I_D$，则发生错误。
- 同样传输的信码为“0”，可是$I > I_D$，则同样发生错误，这两个错误都将引起误码。

灵敏度和动态范围

- 光接收机的灵敏度：满足给定的误码率指标条件下而可靠工作所需要的最小平均光功率P_{min}
- 最小平均光功率P_{min},在国际单位制中，它的单位是瓦(W)。
- 工程上，光接收机的灵敏率常用光功率相对值来表示，单位是分贝毫瓦(dBm)。

动态范围

- 保证系统的误码率指标要求下，光接收机最低输入光功率P_{min}和最大允许光功率P_{max}的变化范围。这个范围用D来表示，一般在工程上用二者(用dBm描述)之差来表示。
- 一台质量好的光接收机应有较宽的动态范围。

4.3 光纤通信系统的设计

对数字光纤通信系统而言，系统设计的主要任务是:

根据用户对传输距离和传输容量(话路数或比特率)及其分布的要求，按照国家相关的技术标准和当前设备的技术水平，经过综合考虑和反复计算。

选择最佳路由和局站设置、 传输体制和传输速率以及光纤光缆和光端机的基本参数和性能指标，以使系统的实施达到最佳的性能价格比。

在技术上，系统设计的主要问题是确定中继距离，尤其对长途光纤通信系统，中继距离设计是否合理，对系统的性能和经济效益影响很大。

中继距离的三种设计方法

- 最坏情况法(参数完全已知)
- 统计法(所有参数都是统计定义)
- 半统计法(只有某些参数是统计定义)

这里我们采用最坏情况设计法，用这种方法得到的结果，设计的可靠性为100%，但要牺牲可能达到的最大长度。

中继距离受光纤线路损耗和色散(带宽)的限制，明显随传输速率的增加而减小。

中继距离和传输速率反映着光纤通信系统的技术水平。

中继距离受损耗的限制

下图给出了无中继器和中间有一个中继器的数字光纤线路系统的示意图，图中符号：

T′，T：光端机和数字复接分接设备的接口；

Tx：光发射机或中继器发射端；

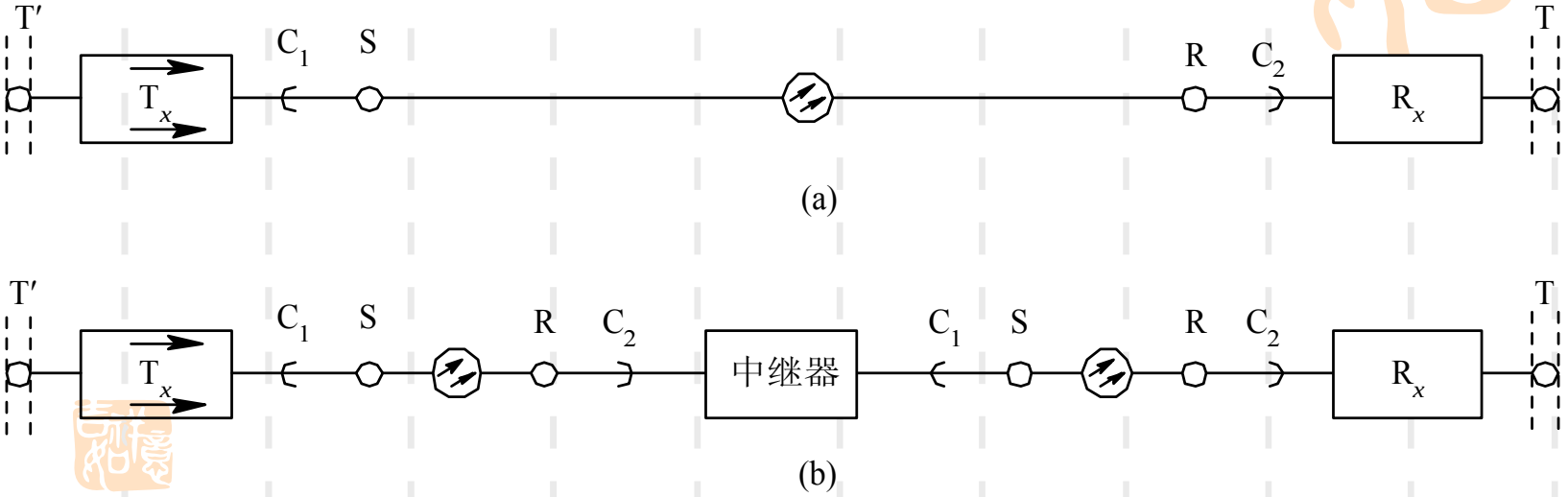
Rx：光接收机或中继器接收端；

C_1, C_2：光纤连接器；

S：靠近Tx的连接器C_1的接收端；

R：靠近Rx的连接器C_2的发射端；

SR：光纤线路，包括接头。



数字光纤线路系统

(a) 无中继器； (b) 一个中继器

如果系统传输速率较低，光纤损耗系数较大，中继距离主要受光纤线路损耗的限制。在这种情况下，要求S和R两点之间光纤线路总损耗必须不超过系统的总功率衰减，即

$$L(\alpha_f + \alpha_s + \alpha_m) \le p_t - p_r - 2\alpha_c - M_e$$

或

$$L \le \frac{p_t - p_r - 2\alpha_c - M_e}{\alpha_f + \alpha_s + \alpha_m} \qquad (4.1)$$

式中，Pt 为平均发射光功率(dBm)，Pr为接收灵敏度(dBm)，αc为连接器损耗(dB/对)， Me 为系统余量(dB)，αf为光纤损耗系数(dB/km)，αs为每km光纤平均接头损耗(dB/km)，αm为每km光纤线路损耗余量(dB/km)，L 为中继距离(km) 。

平均发射光功率P_t取决于所用光源，对单模光纤通信系统，LD的平均发射光功率一般为-3～-9dBm，LED平均发射光功率一般为-20～-25 dBm。光接收机灵敏度P_r取决于光检测器和前置放大器的类型，并受误码率的限制，随传输速率而变化。下表给出长途光纤通信系统$BER_{av} \leqslant 1\times10^{-10}$时的接收灵敏度$P_r$。

传输速率/（Mb s^{-1}）	标称波长/nm	光检测器	灵敏度P_r/dBm
8.448	1310	PIN	-49
34.368	1310	PIN-FET	-41
139.264	1310	PIN-FET APD	-37 -42
4× 139.264	1310	PIN-FET APD	-30 -33

连接器损耗一般为0.3～1 dB/对。设备余量M_e包括由于时间和环境的变化而引起的发射光功率和接收灵敏度下降， 以及设备内光纤连接器性能劣化，M_e一般不小于3 dB。

光纤损耗系数α_f取决于光纤类型和工作波长，例如单模光纤在1310 nm, α_f为0.4～0.45 dB/km; 在1550 nm, α_f为0.22～0.25 dB/km。

光纤损耗余量α_m一般为0.1～0.2 dB/km, 但一个中继段总余量不超过5 dB。 平均接头损耗可取0.05 dB/个，每千米光纤平均接头损耗α_s可根据光缆生产长度计算得到。

根据ITU-T(原CCITT)G.955建议，用LD作光源的常规单模光纤(G.652)系统，在S和R之间数字光纤线路的容限如下表 所示。

S和R之间数字光纤线路的容限

标称速率/（Mb·s^{-1}）	标称波长/nm	BER ≤ 1× 10^{-10}	S和R之间的容限
		最大损耗/Db	最大色散/ps·nm^{-1}
8.448	1310	40	不要求
34.368	1310	35	不要求（多纵模）
139.264	1310	28	300（多纵模）
	1550	28	
4 ×139.264	1310	24	120（多纵模）
	1550	24	

中继距离受色散(带宽)的限制

如果系统的传输速率较高，光纤线路色散较大，中继距离主要受色散(带宽)的限制。

为使光接收机灵敏度不受损伤， 保证系统正常工作，必须对光纤线路总色散(总带宽)进行规范。

对于数字光纤线路系统而言，色散增大，意味着数字脉冲展宽增加，因而在接收端要发生码间干扰，使接收灵敏度降低， 或误码率增大。严重时甚至无法通过均衡来补偿，使系统失去设计的性能。

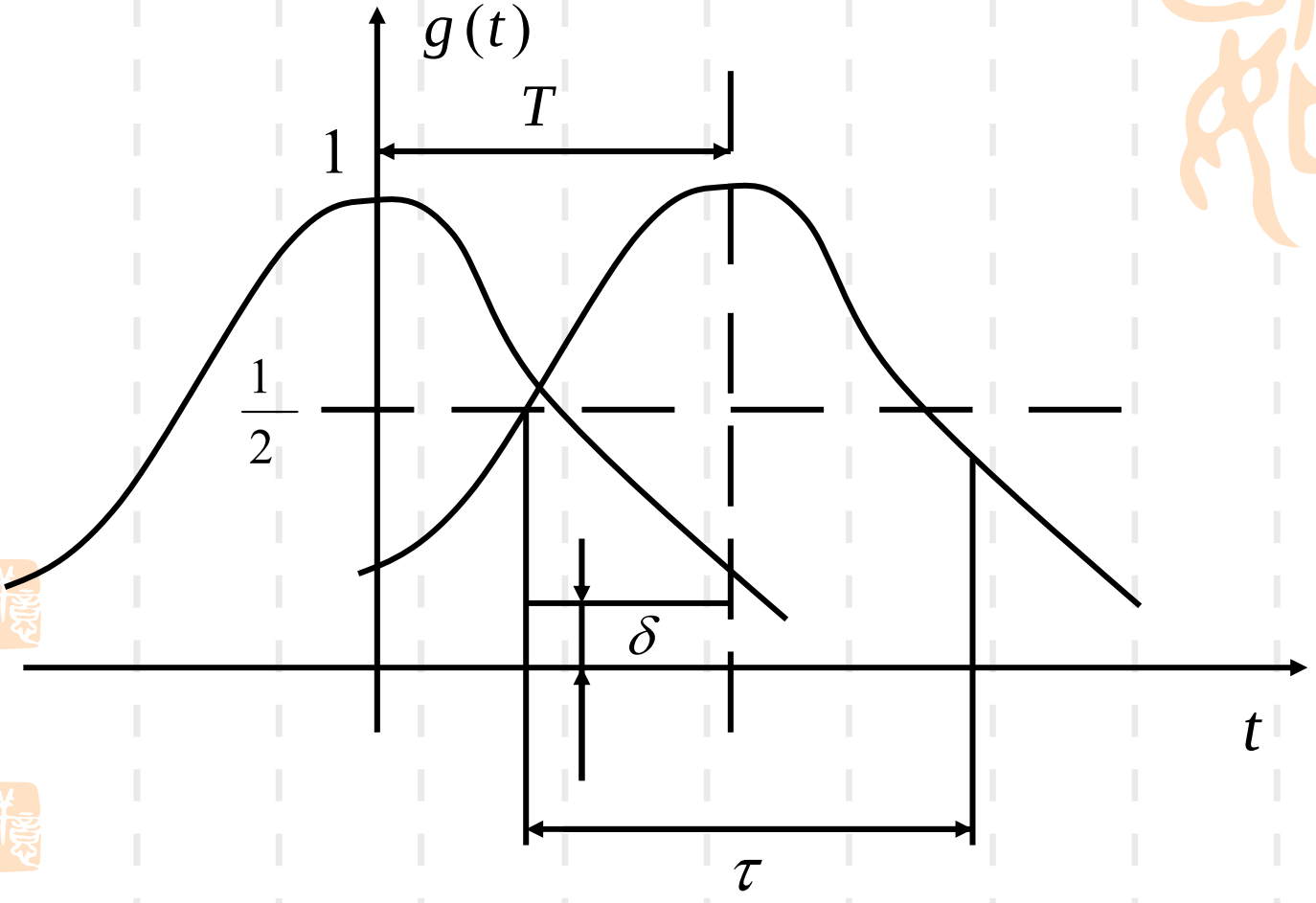
设传输速率为$f_b=1/T$，发射脉冲为半占空归零(RZ)码，输出脉冲为高斯波形，如图5.18 所示。高斯波形可以表示为：

$$g(t)=\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (4.2)$$

式中σ为均方根(rms)脉冲宽度。把σ/T=a定义为相对 rms脉冲宽度，码间干扰δ的定义如下图示。由上式和下图得到：

$$a=\frac{\sigma}{T}=\left(\frac{1}{\sqrt{2\ln(1/\delta)}}\right) \qquad (4.3)$$

由此式得到a和δ的数值关系， 并列于下表。



高斯波形的码间干扰

相对rms脉冲宽度a和码间干扰的关系

$a = \sigma/T$	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
δ	3.4×10^{-4}	3.9×10^{-3}	1.7×10^{-2}	4.4×10^{-2}	13.5×10^{-2}

美国Bell实验室S.D.Personick的早期研究中，曾建议采用下列标准来考查光纤线路色散对系统传输性能的限制。

当a=0.25时，码间干扰δ只有峰值的0.034%，完全可以忽略不计。当a=0.5时，δ增加到13.5%，此时功率代价为7～8dB，难以通过均衡进行补偿。一般系统设计选取a=0.25～0.35，功率代价不超过2 dB。

为确定中继距离和光纤线路色散(带宽)的关系，把输出脉冲用半高全宽度(FWHM)τ表示，即

$$\tau = \sqrt{(\frac{\tau}{2})^2 + (\Delta\tau_f)^2} \qquad (4.4)$$

式中，$\tau=\sigma/0.4247$，$\sigma=aT$，a为相对rms脉冲宽度，$T=1/f_b$，f_b为系统的比特传输速率。$\Delta\tau_f$为光纤线路(FWHM)脉冲展宽，取决于所用光纤类型和色散特性。

对于多模光纤系统，色散特性通常用3dB带宽表示。因此，$\Delta\tau_f=0.44/B$，B为长度等于L的光纤线路总带宽，它与单位长度光纤带宽的关系为$B=B1/L^{\gamma}$。

B_1为1km光纤的带宽，通常由测试确定。$\gamma=0.5\sim1$，称为串接因子，取决于系统工作波长，光纤类型和线路长度。把这些关系代入式(4.4)，并取$a=0.25\sim0.35$，得到光纤线路总带宽B和速率f_b的关系为：

$$B=(0.83\sim0.56)f_b \qquad \textbf{(4.5)}$$

中继距离L与1km光纤带宽B1的关系为$B_1=BL^{\gamma}$，所以

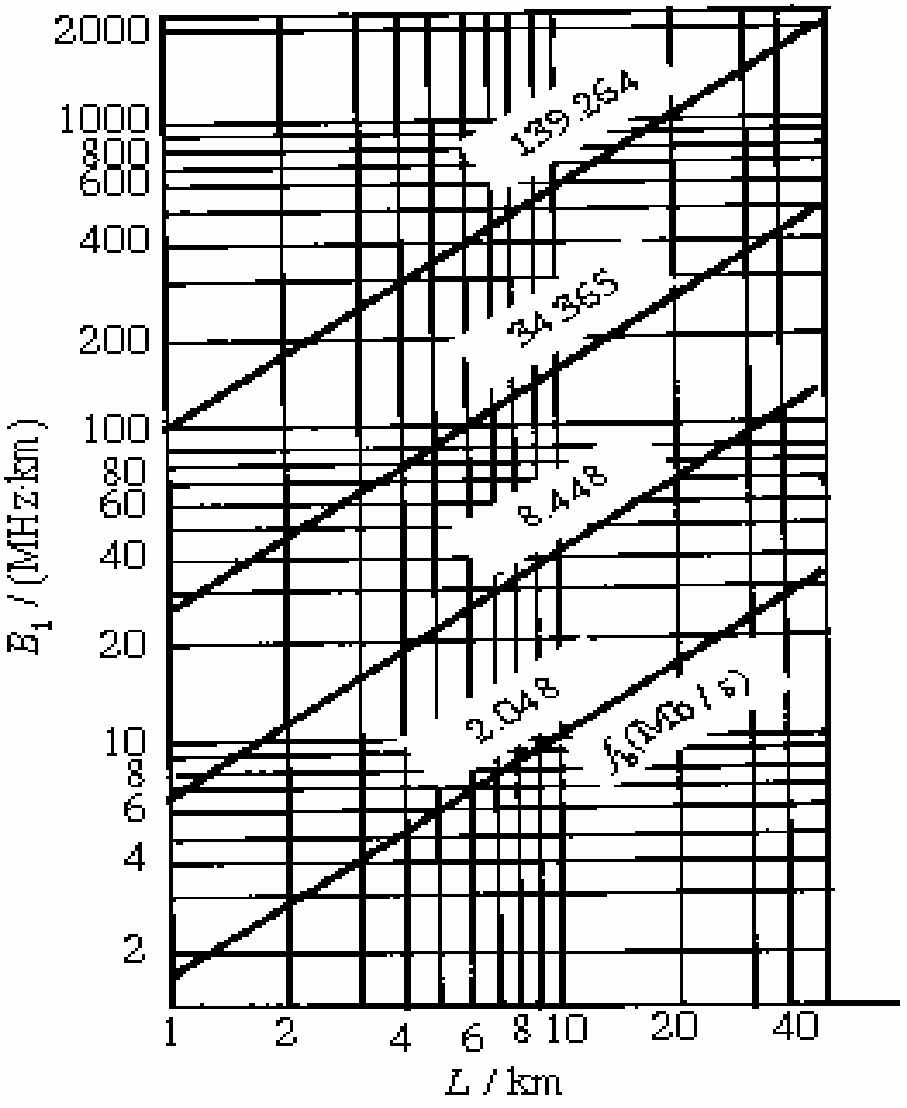
$$L=[\ (1.21\sim1.78)\ \ B_1/f_b]^{1/\gamma} \qquad (4.6)$$

或写成

$$L^{\gamma}f_b=(1.21\sim1.78)B_1 \qquad (4.7)$$

以f_b为参数，B_1与L的关系示于下图，图中取$\sigma/T=0.3$，$\gamma=0.75$。

由此可见，中继距离L与传输速率f_b的乘积取决于1 km光纤的带宽(色散)，这个乘积反映了光纤通信系统的技术水平。



1km光纤带宽B1与中继距离L的关系

对于单模光纤系统，$\Delta\tau_f=2.355\sigma f$，$\sigma_f$为光纤线路rms脉冲展宽。

由式取一级近似，得到$\sigma_f=|C_0|\sigma_\lambda L$，$C_0=C(\lambda_0)$为在光源中心波长$\lambda_0$光纤的色散(ps/(nm · km))，$\sigma_\lambda$为光源谱线宽度(nm)，L为光纤线路长度(km)。

把这些关系式代入式(4.4)，同样得到一个简明的公式。设取$a=\sigma/T=0.25$，得到中继距离：

$$L=\frac{0.226\times10^6}{f_b|c_0|\sigma_\lambda} \qquad \textbf{(4.8)}$$

在这个基础上，根据原CCITT建议，对于实际的单模光纤通信系统，受色散限制的中继距离L可以表示为：

$$L = \frac{\varepsilon \times 10^6}{F_b |C_0| \sigma_\lambda} \qquad (4.8)$$

式中，f_b是线路码速率(Mb/s)，与系统比特速率不同，它要随线路码型的不同而有所变化。C_0是光纤的色散系数(ps/(nm · km))，它取决于工作波长附近的光纤色散特性。σ_λ为光源谱线宽度(nm)，对多纵模激光器(MLM-LD)，为rms宽度，对单纵模激光器(SLM-LD)，为峰值下降20dB的宽度。 ε是与功率代价和光源特性有关的参数，对于MLMLD，ε=0.115，对于SLM-LD，ε=0.306。

由于光纤制造工艺的偏差，光纤的零色散波长不会全部等于标称波长值，而是分布在一定的波长范围内。

同样，光源的峰值波长也是分配在一定波长范围内，并不总是和光纤的零色散波长度相重合。

对于G.652规范的单模光纤，波长为1285～1330 nm，色散系数C不得超过±3.5 ps/(nm · km))，波长为1270～1340 nm，C不得超过6 ps/(nm · km)。

S和R两点之间最大色散CL(ps/nm)的容限如表示。由表可知，在140 Mb/s以上的单模光纤通信系统中，色散的限制是不可忽视的。

中继距离和传输速率

光纤通信系统的中继距离受损耗限制时由式(4.1)确定；中继距离受色散限制时由式(4.6)(多模光纤)和式(4.8)或式(4.9)(单模光纤)确定。

从损耗限制和色散限制两个计算结果中， 选取较短的距离，作为中继距离计算的最终结果。

以140 Mb/s单模光纤通信系统为例计算中继距离

设系统平均发射功率P_t=-3 dBm, 接收灵敏度P_r=-42 dBm，设备余量M_e=3 dB，连接器损耗α_c=0.3dB/对，光纤损耗系数α_f=0.35 dB/km, 光纤余量α_m=0.1 dB/km，每km光纤平均接头损耗α_s=0.03 dB/km。把这些数据代入式(4.1)，得到中继距离

$$L = \frac{-3-(-42)-3-2\times 0.3}{0.35+0.03+0.1} \approx 74(km)$$

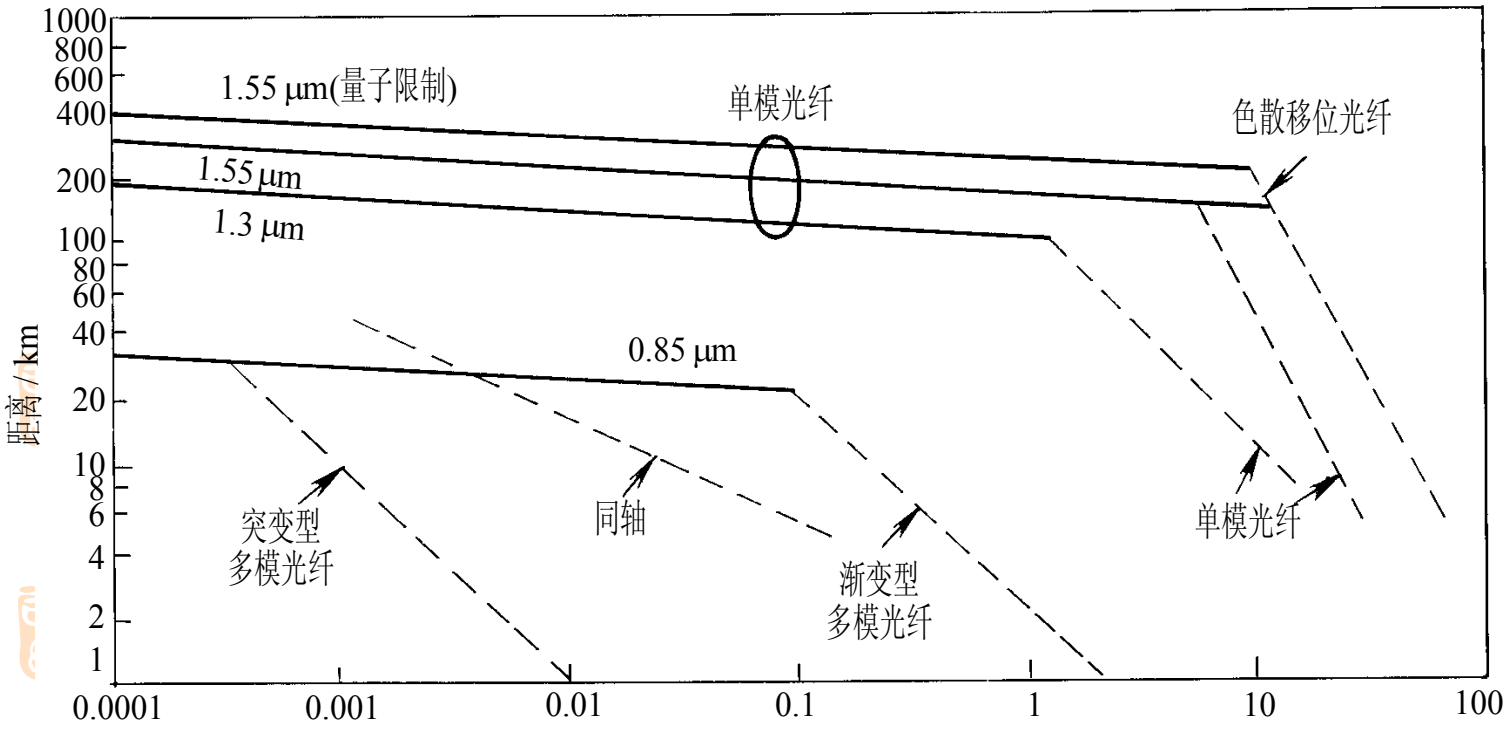
又设线路码型为5B6B，线路码速率 $F_b=140\times(6/5)=168$ Mb/s，$|C_0|=3.0$ ps/(nm · km)，$\sigma_\lambda=2.5$ nm。把这些数据代入式(4.9)，得到中继距离：

$$L=\frac{0.115\times10^6}{168\times3.0+2.1}\approx91(km)$$

在工程设计中，中继距离应取74 km。在本例中中继距离主要受损耗限制。

但是，如果假设$|C_0|=3.5$ ps/(nm · km)，$\sigma_\lambda=3$ nm，而上述其他参数不变，根据式(4.9)计算得到的中继距离L≈65 km，则此时中继距离主要受色散限制，中继距离应确定为65 km。

下图给出各种光纤的中继距离和传输速率的关系，包括损耗限制和色散限制的结果。



各种光纤的中继距离和传输速率的关系

由上图，对于波长为0.85 μm的多模光纤，由于损耗大，中继距离一般在20 km以内。

传输速率很低，SIF光纤的速率不如同轴线，GIF光纤的速率在0.1 Gb/s以上就受到色散限制。单模光纤在长波长工作，损耗大幅度降低，中继距离可达100～200 km。

在1.31μm零色散波长附近，当速率超过1 Gb/s时， 中继距离才受色散限制。

在1.55 μm波长上，由于色散大，通常要用单纵模激光器，理想系统速率可达5 Gb/s，但实际系统由于光源调制产生频率啁啾，导致谱线展宽，速率一般限制为2 Gb/s。采用色散移位光纤和外调制技术，可以使速率达到20 Gb/s以上。

现在可以把反映光纤传输系统技术水平的指标、速率×距离(fb×L)乘积大体归纳如下：

0.85μm,SIF光纤，$f_b \times L \sim 0.01 \times 1 = 0.01$ (Gb/s)·km

0.85μm, GIF光纤，$f_b \times L \sim 0.1 \times 20 = 2.0$ (Gb/s)·km

1.31 μm, SMF光纤，$f_b \times L \sim 1 \times 125 = 125$ (Gb/s)·km

1.55μm, SMF光纤，$f_b \times L \sim 2 \times 75 = 150$ (Gb/s)·km

1.55μm, DSF光纤，$f_b \times L \sim 20 \times 80 = 1600$ (Gb/s)·km

作业

1. 光发射机的基本要求？（数字和模拟系统）
2. ATC和APC的工作原理和实现方法？
3. ECL驱动电路的工作原理？TTL驱动电路的工作原理？
4. 什么是模拟信号的调制深度？什么是数字信号的消光比？
5. 光接收机的组成和技术要求？（数字和模拟系统）
6. 光接收机噪声的构成？（通过热噪声理论分析，阐明构成的主要因素），光接收前置放大器的类型及其特点？
7. 模拟光接收机Pin和SNR的关系？以及光接收灵敏度Pr？
8. 数字光接收机Pin和BER的关系？以及光接收灵敏度Pr？
9. 论述光纤通信系统拓扑结构的设计。
10. 论述光纤损耗和色散对系统设计的限制。

END OF SECTION FOUR

Questions?

Thank you!