



国际电信联盟

# ITU-T

国际电信联盟  
电信标准化部门

# G.663

(04/2000)

G系列：传输系统和媒质、数字系统和网络  
传输媒质的特性 — 光部件和子系统的特性

---

## 光放大器件和子系统与应用相关特征

ITU-T 建议书G.663

(前称“CCITT建议书”)

---

ITU-T G系列建议书

**传输系统和媒质、数字系统和网络**

国际电话连接和电路	G.100-G.199
所有模拟载波传输系统共有的一般特性	G.200-G.299
金属线路上国际载波电话系统的各项特性	G.300-G.399
在无线接力或卫星链路上传输并与金属线路互连的国际载波电话系统的一般特性	G.400-G.449
无线电话与线路电话的协调	G.450-G.499
测试设备	G.500-G.599
传输媒质的特性	G.600-G.699
概述	G.600-G.609
对称电缆线对	G.610-G.619
陆上同轴电缆线对	G.620-G.629
海底电缆	G.630-G.649
光导纤维缆	G.650-G.659
<b>光部件和子系统的特性</b>	<b>G.660-G.699</b>
数字终端设备	G.700-G.799
数字网	G.800-G.899
数字段和数字线路系统	G.900-G.999

如果需要进一步了解细目，请查阅ITU-T建议书清单。

## 光放大器件和子系统与应用相关的特征

### 摘 要

本建议书包含主要应用在数字系统的光放大(OA)器件和子系统与应用相关的特性。这些应用包括在长途网和光接入网中使用于点到点和点到多点配置的单通路和多通路系统。本建议书的目的是确定每种应用要考虑的特征和规定每类OA器件适用的参数值及范围。

### 来 源

ITU-T建议书G.663由ITU-T第15研究组(1997-2000年)修订,并按照WTSC第1号决议规定的程序于2000年4月4日批准。

## 前 言

ITU(国际电信联盟)是联合国在电信领域内的专门机构。ITU-T(国际电信联盟电信标准化部门)是国际电信联盟(ITU)的常设机构。ITU-T负责研究技术的、操作的和资费的问题，并且为实现全世界电信标准化，就上述问题发布建议书。

每四年召开一次的世界电信标准化大会(WTSC)确定ITU-T各研究组的研究课题，然后由各研究组制定有关这些课题的建议书。

ITU-T的成员按照WTSC第1号决议拟定的程序批准建议书。

在ITU-T研究范围内的某些信息技术领域中使用的必要标准是与ISO和IEC共同编写的。

## 注

在本建议书中，“主管部门”一词是电信主管部门和经认可的运营机构的简称。

## 知识产权

国际电联提请注意：本建议书的应用或实施可能需要使用已声明的知识产权。国际电联对有关已声明的知识产权的证据、有效性或适用性不表示意见，无论其是由国际电联成员还是由建议书制定过程之外的其他机构提出的。

到本建议书批准之日为止，国际电联尚未收到实施本建议书时可能需要的受专利保护的知识产权方面的通知。但是，本建议书实施者要注意，这可能不代表最新信息，因此最好查询TSB专利数据库。

© 国际电联 2005

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何形式或手段，电子的或机械的，包括影印和缩微胶卷等对本出版物的任一部分加以复制或使用的。

# 目 录

	页
1 范围 .....	1
2 参考文献 .....	1
3 术语 .....	2
4 缩写 .....	2
5 应用 .....	3
5.1 功率(提升)放大器.....	4
5.2 前置放大器 .....	4
5.3 线路放大器 .....	4
5.4 光放大发送器 .....	5
5.5 光放大接收器 .....	5
5.6 单通路应用 .....	5
5.7 多通路应用 .....	5
5.8 点到点应用 .....	6
5.9 点到多点应用 .....	6
6 运行、管理和维护特征 .....	6
7 OFA 器件的参数值和范围.....	6
7.1 功率(提升)放大器.....	6
7.1.1 点到点 .....	6
7.1.2 点到多点 .....	7
7.2 前置放大器 .....	7
7.2.1 点到点 .....	7
7.3 线路放大器 .....	7
7.3.1 点到点 .....	7
7.3.2 点到多点 .....	7
8 与 OFA 子系统特征有关的 OFA 的参数值和范围.....	7
8.1 光放大发送器 .....	7
8.2 光放大接收器 .....	7
9 环境条件 .....	7
10 光安全性方面 .....	8
附录 I — 单通路点到点的系统内 OFA 器件参数值和范围 .....	8
I.1 功率(提升)放大器.....	8
I.2 前置放大器 .....	9

附录 II — 与传输相关的特征 .....	9
II.1 目的 .....	9
II.2 影响 OA 传输应用的因素 .....	10
II.3 光纤的非线性 .....	10
II.3.1 自相位调制 .....	11
II.3.2 孤子生成 .....	12
II.3.3 互相位调制 .....	13
II.3.4 调制不稳定性 .....	13
II.3.5 四波混频 .....	15
II.3.6 受激布里渊散射 .....	18
II.3.7 受激拉曼散射 .....	20
II.3.8 光纤非线性小结 .....	20
II.4 偏振特性 .....	22
II.4.1 偏振模色散 .....	22
II.4.2 偏振相关损耗 .....	24
II.4.3 偏振烧孔 .....	25
II.5 光纤色散特性 .....	26
II.5.1 色度色散 .....	26
II.6 与 OA 有关的其他特性 .....	27
II.6.1 噪声累积 .....	27
II.6.2 自滤波效应 .....	28
II.6.3 光浪涌的发生 .....	30
II.6.4 SOA 中非线性诱发的饱和 .....	31
附录 III — 前置放大器 .....	32
附录 IV — OA 的 OAM 特征 .....	35
IV.1 OA 子系统 .....	35
IV.2 OA 器件 .....	35

## 光放大器件和子系统与应用相关的特征

### 1 范围

本建议书包括主要应用在数字系统的光放大(OA)器件和子系统与应用相关的特征。包括工作在1550 nm区域或1310 nm区域和其它波长区域的光放大器。OA器件和子系统的一般特性已在ITU-T G.662 [7]中叙述。这些应用包括在长途网和光接入网中用于点到点和点到多点配置的单通路和多通路系统。

本建议书的目的是确认每种应用要考虑的特征和规定每类OA器件(提升放大器、前置放大器和线路放大器)的通用参数值和范围。本建议书适用于内含OA器件的新设备的开发,并包含有在现有设备中应用OA器件及OA子系统的导则。作为一个目标,对于规定应有横向兼容性的系统,不应因使用OA器件而改变它兼容的程度。

本建议书所论述的重要问题有:传输、维护和光安全性等方面的特征。

### 2 参考文献

下列ITU-T建议书和其他参考文献的条款,通过在本建议书中的引用而构成本建议书的条款。在出版时,所指出的版本是有效的。所有的建议书和其他参考文献都会被修订,使用本建议书的各方应探讨使用下列建议书或其他参考文献最新版本的可能性。当前有效的ITU-T建议书清单定期出版。

- [1] ITU-T G.650 (1997), *Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres.*
- [2] ITU-T G.652 (1997), *Characteristics of a single-mode optical fibre cable.*
- [3] ITU-T G.653 (1997), *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable.*
- [4] ITU-T G.654 (1997), *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable.*
- [5] ITU-T G.655 (1996), *Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable.*
- [6] ITU-T G.661 (1998), *Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and sub-systems.*
- [7] ITU-T G.662 (1998), *Generic characteristics of optical fibre amplifier devices and sub-systems.*
- [8] ITU-T G.664 (1999), *Optical safety procedures and requirements for optical transport systems.*
- [9] ITU-T G.671 (1996), *Transmission characteristics of passive optical components.*
- [10] ITU-T G.681 (1996), *Functional characteristics of interoffice and long-haul line systems using optical amplifiers, including optical multiplexers.*

- [11] ITU-T G.692 (1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.*
- [12] ITU-T G.783 (1997), *Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks.*
- [13] ITU-T G.955 (1996), *Digital line systems based on the 1544 kbit/s and the 2048 kbit/s hierarchy on optical fibre cables.*
- [14] ITU-T G.957 (1999), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.*
- [15] IEC 60721-3:1997, *Classification of groups of environmental parameters and their severities.*
- [16] IEC 60825-1:1998, *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide.*
- [17] IEC 60825-2:1993 plus Amd.1 (1997), *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems.*

### 3 术语

本建议书应用ITU-T G.661和G.662给出的定义。

### 4 缩写

本建议书使用下列缩写：

AM 幅度调制

APR 自动功率降低

ASE 放大自发发射

BA 提升(功率)放大器

BER 比特差错比

CD 色度色散

CMC 相干多通路

CW 连续波

DA 色散调节

EDFA 掺饵光纤放大器

FDM 频分复用

FWHM 半最大值处全宽度

FWM 四波混频

LA 线路放大器

LOS 信号丢失

MI 调制不稳定性

OA 光放大器



OAM	运行、管理和维护
OAN	光放大网络
OAR	光放大接收器
OAT	光放大发送器
OFA	光纤放大器
OFDM	光频域复用
PA	前置放大器
PDH	准同步复用体系
PDL	偏振相关损耗
PHB	偏振烧孔
PM	相位调制
PMD	偏振模色散
PSK	相移键控
SBS	受激布里渊散射
SDH	同步数字体系
SMF	单模光纤
SNR	信噪比
SOA	半导体光放大器
SPM	自相位调制
SRS	受激拉曼散射
TRE	终端接收设备
WDM	波分复用
XPM	互相位调制

## 5 应用

OA的应用使光传输系统得到不少改进。最主要的改进是能够实现很长的无中继系统以及很长的无再生系统。应用OA似乎可以取消许多现在的常规再生站，或者在新建路由上不必建设许多新的局站。OA还能使在陆上或海底长途系统和接入网内应用新的光系统体系等重大设想变成现实。这方面的两个例子是波分复用和点到多点应用，迄今为止，通常因为复杂性和价格昂贵都不会考虑使用这些方式。在选择网络升级的方案方面具有潜在优势，因为它与调制形式和比特率都没有关系。

然而，OA的应用也显露出某些新的和可能是严重的系统损伤，这就是由OA产生的功率电平高和再生间距长所引起的损伤。这些传输效应包括光纤的非线性、偏振效应和OA本身的放大特性产生的效应。对于采用OA实现的长距离不再生系统，色度色散也变得越发重要。光纤的色散特性不但决定着色度色散的限值，而且还影响到由几种主要非线性效应产生的损伤的严重程度。因此，在系统设计时必须考虑到对色散的控制。以下各节说明OA的应用和确定每种应用中要考虑到的重要因素。

如果特性是纵向兼容的，本建议书规范的OA器件也能用于增加ITU-T G.955 [13]准同步数字体系(PDH)光线路系统(它们不能横向兼容)的传输距离。为保证OA器件和同步数字体系(SDH)设备之间的横向兼容并满足ITU-T G.690系列建议书的要求，可以采用符合6.1/G.957和6.2.2/G.957的G.957 [14]设备或转发器。

## 5.1 功率(提升)放大器

功率(提升)放大器(BA)是一种高饱和功率的OA器件，直接用在光放大器之后提高其信号功率电平。BA不需要对噪声和光滤波严格要求。BA的运行、维护和管理(OAM)功能可以是与光发送器共用的，也可能是独立的。

BA(经常是与前置放大器配合)的应用，特别是对于诸如海缆系统等那些不希望或不可能在中间某处装有源设备的情况下的应用非常令人感兴趣。对网络运营者而言，不论在何种场合总是中间局站越少维护越容易。提高可用光功率预算的最直接而简单的方法就是直接在正规的光发送器后使用BA或者使用光放大发送器(参见5.4)。

由于相对高的输入功率电平，通常可以忽略不希望的放大自发发射(ASE)噪声，ASE噪声是OA内光子产生统计过程带来的，是内在固有的。然而，BA的应用可能会由于BA产生高的光功率电平和光通道具有长的相互作用长度而导致光纤非线性引入的系统代价。

## 5.2 前置放大器

前置放大器(PA)是一种噪声非常低的OA器件，直接用在光接收器之前，提高它的灵敏度。使用窄带光滤波器可以使ASE噪声能达到所必需的低电平。在这种情况下，让前置放大器滤波器的中心波长能自动调谐在发送器波长上是有好处的，因为这样做能够缓和发送器初始波长容限和它的长期稳定性方面的要求。正如前所述，使用PA(经常是与BA配合使用)是实现大幅度增加可用光功率预算的最直截了当的方法。PA的OAM功能可以是与光接收器共用的，也可能是独立的。在STM-64或更高速率级的系统，采用只有PA的配置能够带来好处(例如，避免了由于光纤非线性引发的潜在问题)。

## 5.3 线路放大器

线路放大器(LA)是一种低噪声OA器件，用在无源光纤段之间提高再生距离，或者和多点连接一致用以补偿光接入网内分支损耗。可以想象，单个LA就能够取代一个以上的常规再生器，显然具有减少传输链路内设备的优点。此外，可以预料在长途网络中会出现既有补偿信号衰减的线路放大器又有补偿信号畸变的常规再生器的情况。

在使用LA的系统内必须具有分离的通信通路，用于对安装在远端的LA实施告警、监测和控制。对于这样的监测通路最好不要对泵激光器的波长或工作窗口的选择产生限制。因为，每个LA必须要能将它自己的状态和告警信息插入，监测通路必须在每个LA恢复、再生(并插入新的信息)和再次发送。

理论上，采用在光通道上循环地插入线路放大器能够实现超长(几千公里)距离传输。然而，在许多OA级联时，由于噪声积累、总增益的频谱相关性、偏振效应和色度色散以及非线性效应会使系统性能劣化。实验室测试表明总的系统性能在较多级联线路放大器的情况与较少级联线路放大器的情况相比更为复杂。特别是，线路放大器串联链路的总增益通常会在特定波长附近形成峰值，它取决于特定的放大器配置，这就使OA的可用工作波长范围大大缩小。因而，这类系统的设计会比只有少量级联线路放大器的情况困难得多。

## 5.4 光放大发送器

光放大发送器(OAT)是一种OA子系统，它是将功率放大器和激光器综合起来变成一个高功率的发送器。发送器和OA之间的连接属于内部不必规范。OAT应用上的考虑总的说来与BA的考虑一样(参见5.1)。

## 5.5 光放大接收器

光放大接收器(OAR)是一种OA子系统，它是将前置放大器和光接收器综合起来变成一个高灵敏度的接收器。接收器和OA之间的连接属于内部不必规范。OAR应用上的考虑总的来说与PA的考虑一样(参见5.2)。

## 5.6 单通路应用

在单通路系统中，BA、PA、LA、OAT和OAR全都能得到应用。在单通路传输的情况，采用低噪声OA与合适的光带通滤波器结合的办法能够降低噪声积累。采用靠近光纤零色散波长运用或使用适当的色散调节(DA)技术，通常能够使色散限值最小。另外，还必须当心非线性效应，如受激布里渊散射(参见II.3.6)和自相位调制(参见II.3.1)，要加以控制。

采用OA的点到点、单通路、长途同步数字体系(SDH)系统的主要光通道接口参数值在ITU-T G.690系列建议书中说明。这些系统的参考配置和功能特性在ITU-T G.681 [10]中说明。

## 5.7 多通路应用

在多通路系统中，OA也能得到应用。除了在单通路系统中见到的传输损伤之外，多通路系统还会遭到某些非线性效应带来的性能劣化。这些包括四波混频(FWM)、互相位调制(XPM)和可能发生的受激拉曼散射(SRS)。因此，在设计多通路系统时，要特别注意避免或减轻这些损伤。在使用串接的LA来获得大的无再生长度的多通路系统中，必须非常注意级联放大器的效应，特别是可用增益谱宽度小的问题。

采用OA的点到点、多通路、长途SDH系统的光接口参数值在ITU-T G.692 [11]中说明。这些系统的参考配置和功能特性在ITU-T G.681 [10]中说明。

## 5.8 点到点应用

在点到点应用中插入OA器件和子系统的配置在ITU-T G.662 [7]中示出(具体参见：图1/G.662、图2/G.662和图3/G.662)。

## 5.9 点到多点应用

OA能够用在光放大网络(OAN)，用以提高光功率预算或使点到多点网络具有更大的分支比。因此，一般说来，在这类网络中会使用功率和线路放大器。一个可能的应用例子就是：在环网中紧挨分支器件之前使用OA来补偿分支损耗。

注 — OA首先的一种应用可能是用于视频信号的分配。在模拟视频信号的情况，为了维持适当的载噪比和避免信号失真，需要比数字应用的OA再附加一些要求。举例来说，如果使用AM调制激光器，OA的增益必须很平坦及避免频率对强度的调制变换，导致信号失真加大。在使用连续波(CW)工作的激光器与外调制器联合的方式中能够使这个效应最小。在这种方式中偏振效应也减到最小。还要特别小心，使OA的输出功率保持在可接受的水平，以便降低诸如SBS等非线性效应。

## 6 运行、管理和维护特征

在附录IV给出关于OA的运行、管理和维护(OAM)特征的某些考虑。

## 7 OFA器件的参数值和范围

本节按照7/G.662, 8/G.662和9/G.662等节所列条目提出OFA器件(BA, PA, LA)的参数值，以便尽可能地保证在点到点系统配置中OFA子系统和OFA器件光的横向兼容性。

### 7.1 功率(提升)放大器

#### 7.1.1 点到点

功率放大器的输出参数属于系统指标，在相关系统建议书(G.690系列)中规范。在附录I可以找到功率放大器输入参数值的一些示例。在相关系统建议书中接口描述的功率放大器的输出参数被认为是可以同样地应用到PDH系统上。

##### 7.1.1.1 单通路系统

在附录I可以找到功率放大器输入参数值的一些示例。输出参数值在ITU-T G.690系列建议书中规范。

##### 7.1.1.2 多通路系统

用于数字多通路系统的功率放大器的参数值尚待研究。

## 7.1.2 点到多点

在点到多点体系中应用所需功率放大器很可能是模拟性质，所以有关参数值尚待研究。

## 7.2 前置放大器

### 7.2.1 点到点

前置放大器的输入参数属于系统指标，在相关的系统建议书ITU-T G.690系列中规范。在附录I可以找到前置放大器输出参数的一些示例。在相关系统建议书中接口描述的前置放大器的输入参数被认为是可以同样地应用到PDH系统上。

#### 7.2.1.1 单通路系统

在附录I可以找到前置放大器输出参数值的一些示例。输入参数值在ITU-T G.690系列建议书中规范。

#### 7.2.1.2 多通路系统

用于数字多通路系统的前置放大器的参数值尚待研究。

## 7.3 线路放大器

### 7.3.1 点到点

#### 7.3.1.1 单通路系统

点到点单通路系统中线路放大器的参数值在ITU-T G.690系列建议书中规范。

#### 7.3.1.2 多通路系统

点到点多通路系统中线路放大器的参数值尚待研究。

### 7.3.2 点到多点

在点到多点体系中应用所需线路放大器很可能是模拟性质，所以有关参数值尚待研究。

## 8 与OFA子系统特征有关的OFA的参数值和范围

### 8.1 光放大发送器

单通路系统光放大发送器的参数值在ITU-T G.690系列建议书中规范。

### 8.2 光放大接收器

单通路系统光放大接收器的参数值在ITU-T G.690系列建议书中规范。

## 9 环境条件

在IEC 60721-3-0 (1984) [15]和修正1 (1987)中规范了各类环境条件。更详细的规定能够在关于存储的IEC 60721-3-1 (1997)，关于运输的IEC 60721-3-2 (1997)，关于防水固定使用的IEC 60721-3-3 (1994)，修正1 (1995)和修正2 (1996)，关于不防水固定使用的IEC60721-3-4 (1995)和修正1 (1996)等文件中找到。

## 10 光安全性方面

在某些情况(光纤折断, 连接器拆开), OA的输出光功率可能会被看到而伤害人眼。在IEC 60825-2 [17]给出了在安装和使用光系统(包括放大器)方面的特殊保护措施和要求以及观察方法的说明。

由于, 主要是提升放大器和OAT等的光功率电平高, 在使用OA器件和子系统的线路系统中光的安全性和光浪涌产生的输出(即, 保护人员和设备)是要关心的主要问题。

在ITU-T G.664 [8]给出关于OA的APR, 再启动和安全操作的合适的程序。

### 附录 I

#### 单通路点到点的系统内OFA器件 参数值和范围

本附录给出单通路点到点系统内OFA器件(BA和PA)的参数值和范围的示例。这些参数值是按7/G.662和8/G.662所列的条目尽可能满足与ITU-T G.957规范的性能值相兼容而得出。

如第7节所指明的那样, 主要光通道的光接口指标由G.690系列建议书提供。

#### I.1 功率(提升)放大器

在表I.1给出的参数值是点到点单通路系统中功率放大器的相关输入参数(如ITU-T G.662所给出)的最少项示例。这个表中只有输入参数, 因为输出参数是系统指标, 并在G.690系列建议书中规范。

表 I.1/G.663—单通路系统功率放大器的输入参数

参 数	单 位	值
输入功率范围	dBm	-6/+3
消除 ASE 的功率电平	dBm	$\leq -20$
输入反射	dB	$\leq -27$
泵泄漏	dBm	$\leq -15$ (注)
输入端容许的最大反射	dB	-27
功率波长带	nm	1530-1565

注一 所测值-15 dBm (最大)是从峰值下降到峰值本身以下30 dB的功率分布范围内得到的全部贡献值。

## I.2 前置放大器

在表I.2给出的参数值是点到点单通路系统中前置放大器(如ITU-T G.662所给出)相关输出参数的最少项示例。这个表中只有输出参数，因为输入参数是系统指标，并应由G.690系列建议书规范。

表 I.2/G.663—单通路系统前置放大器的输出参数

参 数	单 位	值
输出功率范围	dBm	-16/-9
小信号增益	dB	≥20
信号对自发噪声指数	dB	待研究
输出点容许最大反射	dB	-27
最大总输出功率(注)	dBm	-9
(小信号增益)波长带宽	nm	1530-1565

注 — 在OFA内采用光滤波器时，在可用信号波长带宽内测定这个参数。

## 附 录 II

### 与传输相关的特征

#### II.1 目的

OA能够提供很高的光功率电平和使再生器之间的距离更长，使得新的光传输系统体制的设想能够成立。当与波分复用结合时，OA也使信息的多通路传送变得简单，因为它减少了对每通路专用设备的需求。这使它能更经济地获得更大数量的带宽。因为使用OA，现在必须考虑已经显露出来的新的传输效应和制约。这些方面有光的非线性，诸如受激布里渊散射、四波混频和自相位调制。这些新的效应与光纤色度色散和偏振模色散相加或混合在一起。此外，OA的特性也会对系统的损伤有贡献。已经研究出许多解决与传输相关问题的方法。然而，在它们的性能和应用方面使用不同的技术。

为了设计既经济又可靠的OA支持的符合ITU-T建议书的光接口参数的系统，运营商和设备供应商在与OA相关的问题和补救措施方面形成共同的认识是十分重要的。为此，本附录试图说明下列几点：

- 描述光的非线性、偏振和色度色散特性以及在OA支持的传输系统中其它与OA相关的特性对传输产生的影响。
- 确认在各类相关传输系统(例如，数字/模拟、相干、波分复用等)中由上述影响带来的制约。
- 指明对这些损伤可能的补救措施以及相应的有效范围。

## II.2 影响OA传输应用的因素

影响OA传输应用的因素可分为四大类：光的非线性、偏振特性、色散特性和其他与OA相关的特性。以下列出每类中涉及的因素，它们的影响在下一节说明。

- a) 光纤非线性
  - 1) 自相位调制
  - 2) 孤子生成
  - 3) 互相位调制
  - 4) 调制不稳定性
  - 5) 四波混频
  - 6) 受激布里渊散射
  - 7) 受激拉曼散射
- b) 偏振特性
  - 1) 偏振模色散
  - 2) 偏振相关损耗
  - 3) 偏振烧孔
- c) 光纤色散特性
  - 色度色散
- d) 与OA有关的其他特性
  - 1) 噪声积累
  - 2) 自滤波效应
  - 3) 光浪涌的发生
  - 4) SOA中非线性诱发的饱和

## II.3 光纤的非线性

为了在高比特率获得更长的中继段长度而提高光信号功率，随着功率的提高开始出现信号和硅光纤传输媒质之间的非线性交互作用。因此，光纤的非线性质就成为大容量系统和长的无再生路由应用时要考虑的重要问题。这些非线性通常归类为：散射效应(受激布里渊散射和受激拉曼散射)或与光纤的折射率和光强相关性有关的效应(自激调制、互相位调制、调制不稳定性、孤子生成和四波混频)。对这些非线性效应严重程度产生影响的各种参数有：光纤色散特性、光纤的有效截面积和非线性折射率、多通路系统内通路的数目和间隔、总的无再生系统长度、信号强度和光源的谱线宽度。



## II.3.1 自相位调制

### II.3.1.1 效应的描述

因为光纤的折射率与信号的光强度有关系，信号光强度的瞬时变化会引起对它自己相位的调制。这种效应称为自相位调制(SPM)光纤的折射率可以表示<sup>1</sup>为：

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P$$

因此

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_2}{A_{eff}} \frac{\partial P}{\partial t}$$

式中， $n_2$ 是光纤非线性折射率，以 $\text{m}^2/\text{W}$ 为单位； $A_{eff}$ 是光纤有效面积， $P$ 是馈入功率。

在单波长系统中，当光强变化引起相位变化时，自相位调制会使信号频谱逐渐展宽(参见图II.3-1)。一旦SPM引起频谱展宽，信号沿着光纤的长度传播时就会由于色度色散效应，在光纤的正常色散区域内(即零色散波长之下)遭受较大的瞬时扩展。反之，在非正常色散区域，色度色散和SPM能够相互补偿，使瞬时扩展减小。这种现象就是孤子传播的基础(参见II.3.2)。

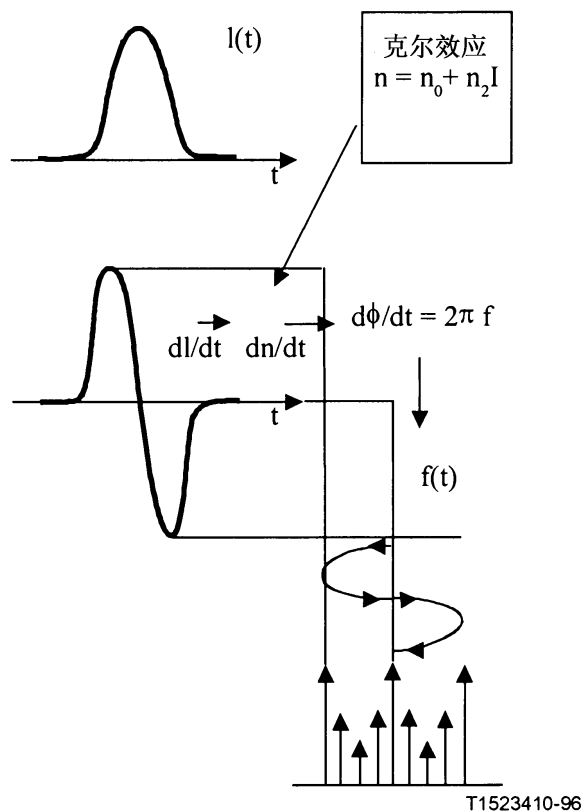


图 II.3-1/G.663—由自相位调制引发频谱展宽的机理

<sup>1</sup> MARCUSE (D.), CHRAPLYVY (A.R.), TKACH (R.W.), Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber WDM systems, *Journal of Lightwave Technology*, Volume 12, Number 5, p. 885, May 1994.

### II.3.1.2 给传输带来的制约

通常，只有在色散累积大的系统或非常长的系统SPM效应才显著。工作在常规色散有限方式的系统可能不能耐受SPM带来的附加影响。在通路间隔很窄的多通路系统，SPM引起的频谱展宽还可能会产生相邻通路间的干扰。在与窄带光滤波器配合应用时，SPM的效应还会引起劣化。因为SPM本质上是单个通路的效应，它不会受到通路数多少的影响。较大的馈入通路功率才会增加SPM的失真代价。较高的通路比特率也会使它增大，因为较高比特率的信号具有更高的比特上升/下降斜率。

在G.652 [2]光纤和在G.655 [5]光纤等具有色散与发送功率函数关系异常的光纤上，SPM的低啁啾强度调制信号会导致脉冲压缩。脉冲压缩抵消色度色散并提供某些色散调节。然而，仍然存在对最大色散和相关传输长度的限制。

### II.3.1.3 使引起的制约减到最小

使用G.653 [3]光纤并将信号通路安排在接近零色散处，能减少SPM的影响。对于大致1000 km以下的系统，采用按G.652光纤系统的长度以适当的间距实行色散补偿的办法可以控制SPM。采用在G.655光纤零色散波长以上工作的方式可以减轻SPM效应。增大光纤有效面积或减小非线性折射率也能降低SPM代价。对于所有的光纤设计，尽管系统设计倾向于使用较大功率来使中继段距离较长，但是减小馈入通路功率可以降低SPM效应。

## II.3.2 孤子生成

### II.3.2.1 效应的描述

在光纤的异常色散区(即，零色散波长之上)非线性折射率和色度色散之间的相互作用会引发出称为孤子脉冲的特殊传播形式，它们会长距离传播周期性地重复产生它们的时域波形和频谱。其他类的信号能够自发的演变成孤子。尽管基本孤子非常稳定，能够用来获得长距离传输，但是高阶孤子会进入很复杂的演变，包括脉冲再整形、频谱调制和脉冲破裂。这些效应可能会损害系统工作。

### II.3.2.2 给传输带来的制约

孤子生成的影响关系到G.652、G.653和G.655光纤系统。虽然基本孤子生成是有用的，但其他的孤子通常会给传输信号带来严重的劣化。因此，高阶孤子的生成能够馈入光纤的最大功率设置了一个极限。

### II.3.2.3 使引起的制约减到最小的方法

使链路工作在零色散波长以下能够避免孤子生成。然而，在这种方式中，不支持孤子传输和色散及非线性贡献到脉冲展宽上。对沿链路的色散进行适当的控制能够使信号劣化最小。

## II.3.3 互相位调制

### II.3.3.1 效应的描述

在多通路系统中，当光强度变化引起相位变化时，由于相邻通路间的相互作用互相位调制(XPM)会使信号频谱逐渐展宽。XPM导致的频谱展宽与通路间隔和光纤色度色散有关，因为色散导致的不同群速度会引起相关作用的脉冲在他们沿光纤往下传播时分离开来。一旦XPM引起频谱展宽，信号在沿光纤传播时由于色度色散效应而遭到较大的瞬时展宽。

### II.3.3.2 给传输带来的制约

较小的通路间隔和较大的通路数会使XPM带来的系统代价增大(尽管其饱和度取决于距离)。正如对SPM的说明，信号相位的变化与光纤折射率变化有关，转而又与通路功率有关。较大的平均馈入功率导致较大的相移，在它们和色散效应结合下就导致较大的系统代价。

对于较高通路比特率XPM代价实际上降低了，因为较低比特率信号遭到更大的比特相互作用或“走过”。

XPM引起的损伤在G.652光纤系统比G.653和G.655光纤系统更显著。XPM引起的展宽会导致多通路系统中相邻通路之间的干扰。

### II.3.3.3 使引起的制约减到最小

适当地选择通路间隔可以控制XPM。研究表明在多通路系统内只有相邻通路对XPM引起的信号失真贡献最大。三个通路系统的中心通路的信噪比(SNR)在将通路间隔加大后会近似于单通路系统的信噪比。因此，使信号通路之间具有合适的间隔，XPM的效应可以忽略不计。对具有每通路功率为5 mW的系统进行的模拟的结果<sup>1,2</sup>表明通路100 GHz已足以降低XPM效应。由于XPM引起的色散代价也能够用沿系统长度按适当间距进行色散补偿的措施进行控制。采用提高光纤有效面积或减小非线性折射率的办法也能降低XPM代价。将光纤的衰减减小到足以保证当脉冲相互“走过”时两个脉冲之间的XPM相位失真几乎相等也可降低XPM效应<sup>1</sup>。

对于所有光纤的设计，尽管系统设计倾向于使用较大功率来使中继段距离较长，但是减小馈入通路功率可以降低XPM效应。

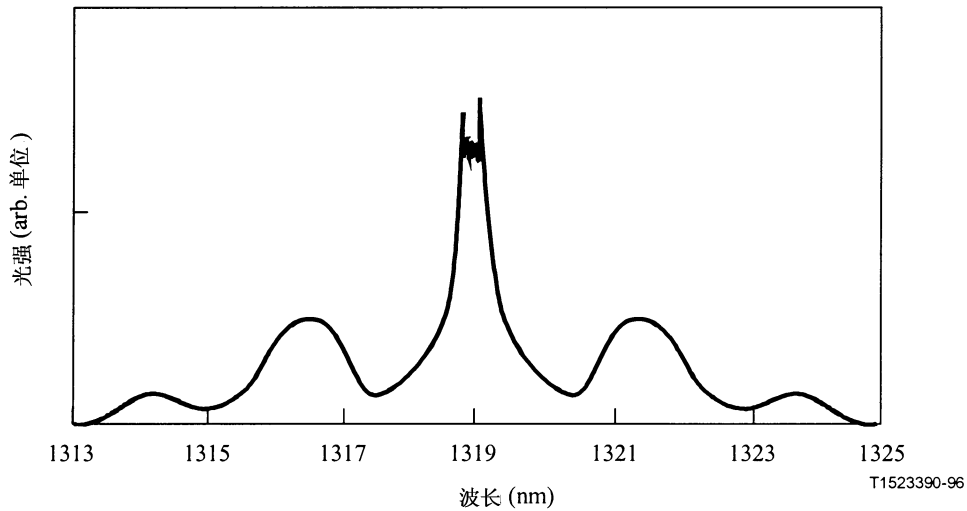
## II.3.4 调制不稳定性

### II.3.4.1 效应的描述

调制不稳定性(MI)使CW信号或脉冲分裂成调制的结构。在异常色散区(即，零色散波长以上)，SPM会引起这种效应，在这种场合准单色信号自发地试图产生两个对称的频谱边带，如图II.3-2示。MI也能够由XPM引发。XPM引起的MI能够在色散异常区和正常区(即，零色散波长以下)出现。

---

<sup>2</sup> KOCH (T.L.), KAMINOW (I.P.), *Optical Fiber Telecommunication, Academic Press, Volume IIIA, Chapter 8, 1997.*



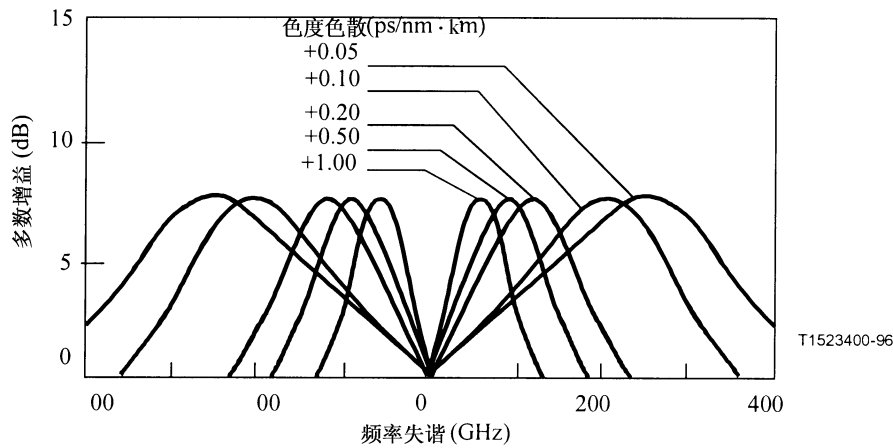
**图II.3-2/G.663—脉冲沿1 km长光纤传播后的功率谱  
(输入脉宽: 100 ps, 峰值功率: 7 W)  
由于MI频谱出现了旁瓣**

对于SPM引起的MI, 边带的频率间隔和增益由波的光强以及光纤的色散和非线性系数确定。由下式给出出现最大变换频率的频率间隔:

$$\Omega_{\max} = \pm \left[ \frac{8\pi^2 c n_2 P_0}{\lambda^3 A_{\text{eff}} D(\lambda)} \right]^{1/2}$$

式中,  $n_2$ 是光纤非线性折射率,  $A_{\text{eff}}$ 是光纤有效面积,  $P_0$ 是馈入功率,  $D(\lambda)$ 是色度色散系数,  $\lambda$ 是工作波长。边带位于距载波 $\pm\Omega_{\max}$ 处, 遭受每单位长度的增益是 $g_{\max}=4\pi P_0/(\lambda A_{\text{eff}})$ 。对上述公式稍加修改就能将光纤损耗考虑进去。在图II.3-3给出, 计入光纤损耗和在不同的光纤色散数值条件下, MI的增益与相对于信号的频率偏移的关系。

可以认为MI是FWM的特例, 在这个特殊情况中两个输入信号强度的光子被换成两个不同频率的光子。



图II.3-3/G.663—在+16 dBm CW信号馈入功率条件下，以五种色散系数值计算得出的30 km (损耗为0.24 dB/km)光纤的MI增益对频率失谐的曲线

### II.3.4.2 给传输带来的制约

由于自发地产生或放大器自发发射引发产生边带，调制不稳定性会降低信噪比(SNR)。因为预计在 $g_{\max}$ 值很大和 $\Omega$ 靠近信号带宽时信号劣化会最大，所以在色散位移光纤链路使用直接调制的激光器时使用很大功率的提升放大器会使MI很严重。在长距离无中继系统，能够在较低功率水平观察到MI，并可能导致级联OA的自发发射噪声过度放大。信号频谱尾部的展宽能够导致信号 — 载波降低，利用窄带ASE滤波或很长系统中的自滤波效应可以使尾部削弱。

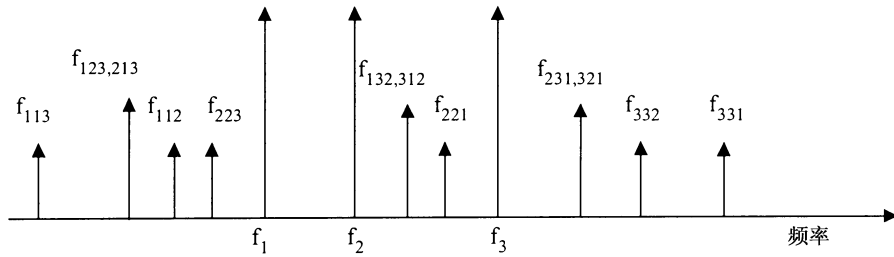
### II.3.4.3 使引起的制约减到最小的方法

采用降低功率电平或在链路的零色散波长之下工作等方法都能够使MI效应最小。控制色散减小MI边带生成也是有效的方法。另外，应对接收信号进行电滤波以降低寄生放大噪声。激光器的外调制能得到更窄的频谱，可以显著地减小MI的影响。

## II.3.5 四波混频

### II.3.5.1 效应的描述

四波混频(FWM)也称为四光子混合，在两个或三个不同波长的光波相互作用时出现，在其波长上产生新的称为混频产物或边带的光波。在多通路系统的信号之间、OA ASE噪声和单个通路之间、单通路的主模和边模之间都会出现这种相互作用。在两个信号的情况，在它们的差拍频率上的强度调制对光纤折射率进行调制，在差频上产生相位调制。相位调制在由这个差值给出的频率上生成两个边带。在三个信号的情况，产生更多、更强的混频产物(参见图II.3-4)，当通路按频率相等的间隔时，这些产物会直接落入相邻的信号通路。如果边带和原始信号之间具备相位匹配条件，沿光纤传播的两个光波会以很高的频率产生FWM。



T1523370-96

图 II.3-4/G.663—三信号四波混频产生的混频产物

假设所有通路具有同样的输入功率且通路间隔相等，光纤的FWM频率、 $\eta$ ，能够表达为FWM功率对通路从光纤输出的功率之比，且正比于<sup>3</sup>：

$$\eta \propto \left[ \frac{n_2 P}{A_{eff} D (\Delta\lambda)^2} \right]^2$$

式中， $n_2$ 是光纤非线性折射率， $P$ 是通路输入功率， $A_{eff}$ 是光纤有效面积， $D$ 是光纤色度色散系数， $\Delta\lambda$ 是通路间隔。注意，增大比特率不会影响FWM效率。

### II.3.5.2 给传输带来的制约

FWM边带的产生能够显著地削弱信号功率。再者，当混频产物直接落入信号通路时，它们会造成参数干扰，它们表现为信号脉冲的幅度增大或缩小，与信号和边带的相位相互作用有关。

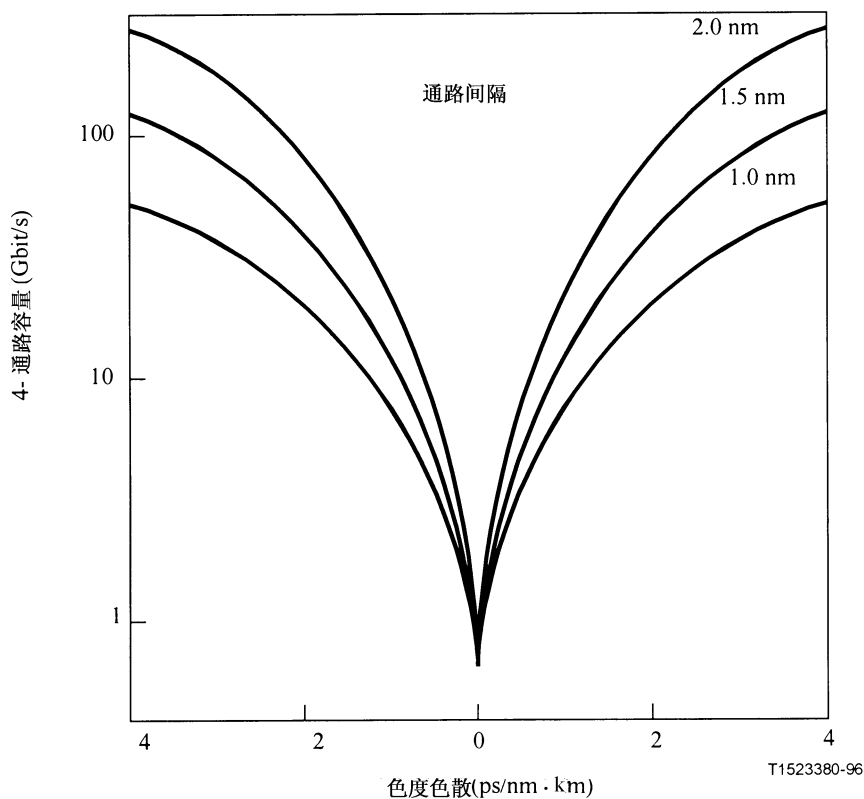
参数干扰使接收器输出的眼图闭合，从而使比特差错比(BER)性能劣化。多通路系统倾向于更多的通路数，这样会增加可能落入信号通路的混频产物的数量。

正如上一节的公式所显露的情况，增大频率间隔和色度色散会破坏相互作用的波之间的相位匹配，使得FWM过程的效率降低。然而，总是倾向于减小系统的频率间隔，以便在同样的OA通带内安排更多的通路。再者，随着馈入通路功率的增大FWM效率(因而，系统代价)也会增大。

在G.652 [2]光纤上工作在1550 nm窗口的多通路系统遭受的FWM损伤比在G.653 [3]光纤上的系统要小许多，因为G.652光的色度色散更大，光纤有效面积也更大。相反的，信号通路直接置于零色散波长或附近就可能在相对短的光纤长度上(即，数十公里)使FWM产生激增。

当使用在G.653光纤的1550 nm零色散区时，有时候称为C波段四波混频能够对G.653光纤上的多通路系统造成严重的系统损伤，因为信号通路只经受小的色度色散。在图II.3-5表示对于一个有三个放大段的四通路系统，色散对可以获得的系统容量的影响。该图表明在引发混频产物的条件具备时，在高的功率电平会发生的情况。根据四个中心位于图示色散值附近的8 dBm信号通路的FWM过程产生的混频产物的最坏情况计算得出这些容量限值。这说明信号通路遭受的色散愈接近零，该系统对FWM引起失真的耐受程度愈差。

<sup>3</sup> KAMINOW (I.P.), KOCH (T.L.), Optical Fiber Telecommunications, *Academic Press*, Volume IIIA, p. 213, 1997.



图II.3-5/G.663—存在FWM时色散对系统容量的影响

为了消除在C波段FWM效应已发展了非零色散位移光纤，G.655 [5]光纤。然而，按通路间隔50 GHz或更小、光纤色散、光纤非线性系数(正比于非线性折射率除有效面积)，哪怕在G.655光纤上四波混频也可能损伤多路系统。

在单通路系统中，在OA ASE噪声和传输通路之间以及在光发射器的主模和边模之间能够出现FWM相互作用。由于ASE通过非线性折射率的累积效应相位噪声叠加在信号载波上，从而使信号频谱的尾部展宽。

### II.3.5.3 使引起的制约减到最少

正如前面所指出，可以使用像G.652和G.655那样的光纤来抑制产生FWM边带。增大光纤有效面积或降低非线性折射率也能降低FWM效率。还可以采取使通路间隔不均等的安排，缓解FWM损伤的严重程度。在G.653光纤系统中降低输入功率电平，可以容许多通路工作，但是却抵消了光放大的经济优势。

为了适当抑制混频产物的产生，已推荐使用在OA放大波段内具有允许的最小色散(即，非零色散)的光纤(包括现有的或尚在研究的新建议书)。作为一种可能的选择，也考虑将非零色散光纤和相反特性的光纤交替相间使用，从而使光缆的净色度色散最终维持接近于零的值。然而，这种交替使用要在外设环境引入第二类型光纤，而在安装、运行和维护方面存在困难。还研究了另一种类似的方法，使用长段色散值有限的光纤和短段色散相反但值高的光纤相交替来获得补偿。实际上，在循环放大的链路内，一小段短的补偿光纤能够放在安装光放大器的机箱内。

不均匀的通路间隔和更大的通路间隔已被推荐为一种方法，它可以削弱非线性效应，使得在G.653光纤上能发展密集WDM系统。不均匀的通路间隔保证由三个或更多通路产生的混频产物不会直接落入其他通路的波长。然而，使通路间隔不均匀并不会影响从信号向混频产物的功率传递(即，信号削弱)，仍然会产生显著的眼图闭合。增大通路间隔也会减小四波混频的影响。由于光放大器的级联降低了可用放大频谱的宽度，这种增益波段变窄的效应可能会制约这些缓解技术的使用。不幸的是，不均匀通路间隔和增大通路间隔还要求OA的通带更大些。

建议除1550 nm波段外WDM传输使用更长的波长(L波段)。采用长波段(L波段)传输，一般说来对所有类型的光纤都适用，因为它使波长的总数增加。在G.652和G.654光纤上用L波段传输，因为其色散值大可能需要色散补偿。使用G.653光纤，L波段传输能简化波长设计，因为在L波段内观察到FWM效应最小。在G.653光纤内L波段的色散可能要根据传输比特率进行色散补偿。

注一 L波段的定义有待研究。

## II.3.6 受激布里渊散射

### II.3.6.1 效应的描述

在使用窄谱线光源的强度调制系统中，当超过受激布里渊散射(SBS)门限时，主要的光功率就从前向传播信号转移到后向传播信号。在SBS中，声子散射前向传播的光。然而，单模光纤只引导后向传播的光。散射光在1550 nm往下遍移(或布里渊偏移)大约11GHz。

对于上述非线性效应，SBS具有最低的门限功率。研究表明，SBS的门限会因光纤类型，甚至是个别的光纤而不同。对于外调制、窄谱线光源、SBS门限的典型值为5到10 mW；对于直接调制激光器，可能会是20到30 mW。采用G.653光纤的系统比使用G.652光纤的系统其SBS门限稍微小些，因为G.653光纤的有效面积更小。对于所有的非线性效应，这一般总是正确的。SBS门限受光源谱线宽度和功率电平的影响很大。它与通路数目无关。



### II.3.6.2 给传输带来的制约

SBS有效地限制了通过光纤通道能传输的总光量。图II.3-6<sup>2,4</sup>表明对窄带光源的这种效应，在这种场合所有的信号功率都落在布里渊带宽内。发送的功率变饱和，后向散射的功率迅速增加。在出现这种迅速增加点的输入光纤的功率电平被定义为SBS门限。在一般情况，SBS门限表达为：

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

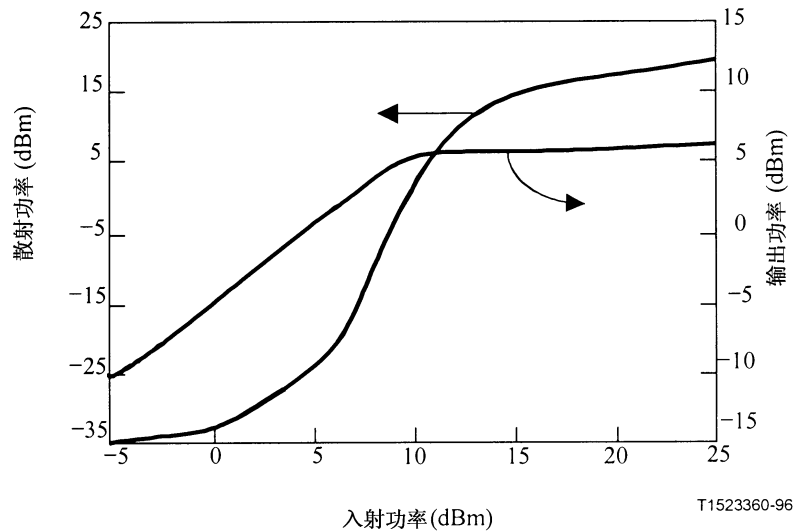
式中， $g$ 是布里渊增益系数( $\sim 4 \times 10^{-9}$  cm/W)， $A_{eff}$ 是光纤有效面积， $K$ 是由偏振状态的自由度决定的常数(在G.652光纤， $K=2$ )。 $\Delta\nu_B$ 和 $\Delta\nu_p$ 分别表示布里渊带宽和泵光源的谱线宽度， $L_{eff}$ 表示定义如下的有效长度：

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

式中， $\alpha$ 是光纤衰减系数， $L$ 是光纤长度。

SBS门限值， $P_{th}$ ，取决于泵光源的谱线宽度， $\Delta\nu_p$ 。当泵光源的谱线宽度小得可与布里渊带宽相比时，SBS门限功率能够按如下关系式估算：

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}}$$



图II.3-6/G.663—窄带光源的受激布里渊散射效应

<sup>4</sup> MAO (X.P.), TKACH (R.W.), CHRAPLYVY (A.R.), JOPSON (R.M.), DEROSIER (R.M.), Stimulated Brillouin Threshold dependence on fiber type and uniformity, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Volume 4, pp. 66, 1992.

### II.3.6.3 使引起的制约减到最小

在光源的谱线宽度显著超过布里渊带宽的系统或者信号功率小于(按II.3.6.2的表达式计算得出的)门限功率的系统中,不会产生受激布里渊散射损伤。

注一 在附录III/G.650 [1]中找到关于SBS的更多资料。

### II.3.7 受激拉曼散射

#### II.3.7.1 效应的描述

受激拉曼散射是宽带效应,它涉及光和硅分子振动模的相互作用。SRS产生一个信号波长,这个信号波长无论是对其他信号通路还是对自发散射的拉曼偏移光等更长的波长都起着拉曼泵的作用。在任何情况下,这个放大较长波长信号的过程使较短波长信号衰减。

#### II.3.7.2 给传输带来的制约

受激拉曼散射(SRS)会出现在单通路和多通路系统中。没有线路放大器的单通路系统要在信号功率达1W或更大时才会遭受到只是这种现象引起的损伤。然而,在多通路系统中,当相隔宽波长范围的较短波长信号的部分功率通过SRS而传递到较长波长通路时,就会使其信噪比性能劣化。这就使系统的通路总数、通路间隔、平均输入功率和总系统长度等系统的总能力受到限制。实际上,在非色散位移光纤中由于拉曼增益引起实测1dB代价的门限值可按下式估算<sup>2,5</sup>:

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40mW \cdot nm \cdot Mm$$

式中,  $P_{tot}$ 是所有通路的组合功率,  $\Delta\lambda$ 是信道所分布的光谱,  $L_{eff}$ 是有效长度[以 $10^6$ 米(Mm)为单位]。使用G.653光纤的系统比使用G.652光纤的系统SRS门限稍低,因为G.653光纤的有效面积更小。SRS实际上不劣化单通路系统,相反却会限制WDM系统的能力。

#### II.3.7.3 使引起的制约减到最小

在单通路系统,能够使用滤波器来除去不希望的频谱。然而,在多通路系统消除SRS效应的实用技术还未见报道。降低输入光功率也可以削弱SRS效应。然而,对于当前正规划部署的WDM系统,SRS好像还没有引起实际的制约。

### II.3.8 光纤非线性小结

在表II.1中给出前节所述光纤非线性效应的小结。

---

<sup>5</sup> CHRAPLYVY (A.R.), TKACH (R.W.), What is the actual capacity of single-mode fibers in amplified lightwave systems? *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Volume 5, pp. 66, 1993.

表 II.1/G.663—光纤的非线性效应

非线性光效应	原因	特性	SMF中的临界光功率	影响
自相位调制 (SPM) 和互相位调制 (XPM)	与光强有关的折射率	— 相移 • 自身引发, (SPM) • 相邻通路引发, (XPM) • 频谱展宽	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$	— 频谱展宽使色散效应增大 — 功率/色散使高比特率传输受到限制 — 初始脉冲压缩(在正色散区) — 加速的脉冲扩展(在负色散区) — 脉冲传播(孤子) — AM/PM 转换使 PSK 系统受到限制
四波混频(FWM) 或四光子混合	与光强有关的折射率	— 产生的混合产物 $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k (i, j \neq k)$	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$ (对 G.653 光纤) — 取决于特定的参数, 例如通路间隔和靠近 $\lambda_0$ 的程度	— 在 WDM 系统中光串话 — 信号功率耗散
受激布里渊散射 (SBS)	光子声子的相互作用	— 后向的布里渊谱线 $f - \Delta f$ $\Delta f = \sim 13 \text{ GHz}$ (1310 nm) $\Delta f = \sim 11 \text{ GHz}$ (1550 nm)	$P_c > \sim 5 \text{ mW}$ (对于窄谱线光源) — $P_c$ 随信号谱线宽度增大而增加	— 信号不稳定性 — 光纤的光损耗 — 双向多通路系统中光串话
受激拉曼散射 (SRS)	光子声子的相互作用	— 拉曼谱线 $f - n \Delta f$ (斯托克斯谱线) $\Delta f = \sim 12 \text{ THz}$ $\Delta \lambda = \sim 70 \text{ nm}$ (1310nm) $\Delta \lambda = \sim 102 \text{ nm}$ (1550nm)	$P_c > \sim 1 \text{ W}$ (对于单通路) $P_c > \sim 1 \text{ mW}$ 对于在具有临界通路间隔 $\Delta \lambda$ 的 WDM 系统内的拉曼放大	— 光纤的光损耗 — 在 WDM 系统中光串话 — 信号功率耗散

在表II.2给出第二个小结, 比较长途系统的发展方向和非线性系统代价对它的影响。

表 II.2/G.663—长途系统发展方向和非线性代价间的关系

长途系统发展方向	SPM 影响	XPM 代价	FWM 代价	SBS 代价	SRS 代价
(a) 减小通路间隔	—	↑	↑	ffs	ffs
(b) 增加通路数量	—	↑	↑	ffs	↑
(c) 增加通路功率	↑(注)	↑	↑	↑	↑
(d) 增加中继段数量(长距离)	↑	↑	↑	↑	↑
(e) 提高通路比特率	↑	↓	—	↓	ffs
(f) 利用别的复用方法(例如偏振模复用)增加通路数	ffs	ffs	ffs		
(g) 利用别的信号编码方法(例如偏振模复用)增加通路比特率	ffs	ffs	ffs		

注 — 对于系统性能的影响可能是好的(孤子生成)也可能是坏的。  
 ↑ 代价增大  
 ↓ 代价减小  
 — 对代价没有显著的影响  
 ffs 代价有待研究

## II.4 偏振特性

### II.4.1 偏振模色散

#### II.4.1.1 效应的描述

我们知道，圆形对称介质波导的基模是双简并模。在实际光纤中这种简并由双折射分离。双折射可能是有意引入的，例如在偏振保持光纤中，也可能是光纤生产或光缆生产中不该有的。在这种情况下，双折射是因例如地形或压力引起的扰动而随机引入的。

两个正交模的传播常数， $\beta_i(\omega)$ ，能够用泰勒级数围绕中心频率， $\omega_o$ ，展开：

$$\beta_i(\omega_o) = \beta_i(\omega_o) + \left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o)^2 + \dots$$

式中， $\beta_i(\omega_o)$ 是相速 $v_p$ ， $\frac{\partial \beta_i}{\partial \omega}$ 与群速 $v_g$ 有关， $\frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2}$ 与群速的散布(或色度色散，D)有关。

随着色散位移光纤的开发和使系统工作在靠近零色散波长，现在色散的二阶项(或色度色散)的贡献减小了，而一阶项变得重要了。对于双折射光纤的情况，这个一阶项导致称为偏振色散的群延迟。这个偏振色散使正交的两个偏振状态之间的群延迟不一致。尽管偏振模色散(PMD)的效应是随机地改变在光纤中传播的脉冲的偏振状态，但能够在输入规定一对正交状态或“主状况”，这个主状况的输出状态还是正交的，显得不受第一阶项波长的影响。

(然而，在某些情况，这种近似不能成立，主状况会表现出与波长相关，通过与色度色散的耦合导致系统进一步劣化)。

正如第一节所述，由局部随机的和非对称的机理，如应力、弯曲和扭绞导致引入光纤的双折射。这些随机的双折射机理重新确定沿光纤长轴的局部双折射轴线，从而使沿光纤长轴的偏振模之间随机耦合。成

缆过程也会引入某些数量的随机双折射和随机模耦合。这样变化之间的光纤长度通常称为耦合长度，对于一条光纤通常耦合长度是指所有局部耦合长度的总平均值。再者，局部环境条件，例如温度的变化会使局部双折射轴线产生波动，从而引起随机的偏振耦合。作为偏振耦合随机改变的一种结果，群延迟差的幅值变成统计上变化的函数。这表明可用麦克斯韦尔分布函数来描述群延迟差值的分布，定义为：

$$P(\Delta\tau) = \frac{32\Delta\tau^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left[-\frac{4\Delta\tau^2}{\pi \langle \Delta\tau \rangle^2}\right]$$

式中， $\Delta\tau$  是两个主状态之间群延迟的差值， $\langle \Delta\tau \rangle$  是平均群延迟差值。由于偏振模色散的统计性质， $\langle \Delta\tau \rangle$  的幅值按光纤或光缆长度的平方根增加。偏振模色散通常以ps或ps/√km为单位。对于具有固定色散的单个光元件(例如，耦合器或隔离器)或者不出现模耦合的短段光纤，通常用ps为单位。

### II.4.1.2 给传输带来的制约

在数字传输系统，偏振模色散的主要影响是引起符号间的干扰。作为一个近似的经验规则，可以认为在总的瞬时群延迟差值等于  $0.3 \cdot T$  ( $T$  为比特的时间间隔) 时产生 1-dB 的代价。对于最大可容许系统功率代价这是一个可接受的值。高比特率系统的比特时间间隔较短，所以他们可容许的群延迟差值较小。尽管问题仍然没有求得解答，当前研究表明光纤和光缆应根据偏振模色散的平均水平进行规范，对单通路和多通路系统的研究也反映了一种观点，在那些应用场合的平均水平也应规范。这相当于群延迟平均差值等于十分之一比特时间间隔，即  $0.1 \cdot T$ 。对于级联的光缆链路已建议统计指标为  $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。在考虑到麦克斯韦尔统计特性和其他分量的类似值，对于 400 km 段在 10 Gbit/s 代价超过 1 dB 的概率小于  $0.4 \times 10^{-7}$ 。因而，PMD 损伤能够看成系统功率代价与这个代价会被超过的概率的组合。增加通路数将增加至少是它们之一超过  $0.3T$  的可能性。

再者，在应用偏振扰乱器(一种有意对信号激光器的偏振状态进行调制使之呈现去偏振状态的器件)的长途放大系统中，偏振模色散导致信号偏振程度加大。由于损耗与偏振有关和偏振烧孔(参见下节)效应，这会使性能劣化。在模拟系统中，偏振模色散和激光器啁啾的相互作用导致与调制频率成正比的二阶失真。当系统呈现额外的偏振相关损耗时，会招致更大的与调制频率无关的二阶代价。

如前面已说明过的那样，二阶效应会引起偏振模色散和色度色散之间的耦合。这是由于波长与差分群延迟有关引起的，更主要的是由于波长与主偏振状态有关引起的。这会导致对色度色散的统计贡献。这是一个未知领域，正在研究之中。使用色度色散补偿器件也对PMD代价有未弄清楚的影响。较高的馈入通路功率对非线性PMD的影响也待研究。

对于放大的1550 nm系统，在老式光纤上工作在10 Gbit/s或更高的TDM系统比更新的G.652, G.653或G.655光纤似乎有更多的PMD产生。

### II.4.1.3 使引起的制约减到最小的方法

既然已经知道问题是由双折射引起的，因而在尽量减小偏振模色散效应上就集中在减小光纤和光缆制造引起的双折射。要注意优化光纤制造过程保证它的几何和光学上圆形的对称性，和/或减小偏振模耦合。用来制造光缆的材料和工艺应能减小在缆结构上施加给光纤的残余应力。也可采用精巧的光缆结构，引入圆形构件降低双折射。小心地进行设计使线性双折射被抵消，能制造出偏振模色散为零的光缆。典型地，光纤和光缆的平均偏振模色散在以下范围内：

$$0 < \langle \Delta\tau \rangle < 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$$

减小PMD效应的另一种方法是使用前面导入的主状态概念。在这个方法中，偏振控制器插在系统的输入和输出端。偏振控制器输出之后接有偏振射束分裂器，用来产生一个误差信号。输出偏振器搜索该误差信号，再调节输入偏振器使误差信号最小。在没有误差信号的那一点的输入偏振状态就是系统的主状态之一。这种最多延迟1比特时间间隔的技术已用于5 Gbit/s系统的补偿。相干频分复用(FDM)系统也是应用类似技术。

## II.4.2 偏振相关损耗

### II.4.2.1 效应的描述

信号通道中无源光器件，例如，隔离器、耦合器等的二色性引起偏振相关损耗(PDL)。当信号经过二色性元件时，它的与损耗轴线平行的电场分量受到耗减。与偏振模色散情况一样，决定偏振相关损耗的轴线方向彼此之间是随机的。

### II.4.2.2 给传输带来的制约

为了验证偏振相关损耗的效应，我们研究一种可能的系统配置。在放大的系统中，放大器的一种控制模式是按固定的信号功率工作。偏振相关损耗对信号和噪声同样产生影响。然而，因为噪声是去偏振的，所以信号和噪声受到的影响不同。噪声能够分解为一个与信号平行的分量和一个与信号正交的分量。显然，PDL和光放大的组合效应总是增大噪声与信号正交的分量。再者，当信号偏振因偏振模色散而改变时，正交噪声分量的幅度会随之变化。这会使接收机的信噪比及Q值降低。再者，波动的时间会导致接收机的信噪比和Q值衰落，二者都会损伤系统性能。

在模拟系统，偏振相关损耗能和激光器啁啾和偏振模色散相互作用，以复合二阶失真的形式降低系统性能。如所预计，这种损伤随时间变化，使系统复合二阶失真随时间波动。

### II.4.2.3 使引起的制约减到最小的方法

作为偏振模色散的情况，尽量减小光元件的偏振相关损耗最重要。然而，应当指出偏振相关损耗对系统的影响会随放大器个数的增加而增加。例如，在长途海底系统，由于放大器的数量可能会达到几百个，所以要求特别苛刻。在短途陆上系统，只有少数放大器级联，偏振相关损耗对系统性能的影响尚待研究。

已经证明：偏振调制或扰偏会因为减低了波动和提高了平均Q值而使系统性能得到改善。在II.4.3.3将更全面地说明这个技术。

## II.4.3 偏振烧孔

### II.4.3.1 效应的描述

偏振烧孔(PHB)是由于偏振的饱和信号馈入掺饵光纤产生各向异性饱和导致的结果。这会使得与偏振场方向一致的激励状态的选择性粒子减少。因而，正交方向的可用增益较高。尽管在玻璃材料中饵离子的分布是随机的，而在微观上，和饵离子相关的偶极子是各向异性的。在线性偏振饱和和信号与偶极子主轴方向上一致情况偏振烧孔效应最大，而在饱和信号的偏振状态呈椭圆或圆形的情况该效应减小。信号激光器和泵激光器都对总效应有贡献，总的差分增益是两种贡献的矢量和。烧孔的程度正比于饱和信号偏振的程度。对于无偏振的饱和信号没有烧孔效应。原则上，这类似于圆形偏振信号的情况。

### II.4.3.2 给传输带来的制约

偏振烧孔影响系统的性能，使沿放大器链路产生的噪声比按简单线性理论预期的值更大。这就是偏振烧孔使信噪比降低，以及在偏振模色散和偏振相关损耗的情况，测得的Q值随时间波动。对偏振烧孔有两种贡献，也就从两个方面影响系统性能。总的效应正比于增益饱和，随饱和的程度增加而增加。

首先，让我们考察偏振的泵激光器的效应。对于这个讨论，可以认为泵的偏振是固定不变的。泵引起与其偏振轴正交方向上的差分增益。正交方向的噪声比与泵方向一致的噪声遭受更大的增益。然而，沿链路的每个放大器的泵激光器的偏振轴彼此并不对准。因此，累积的效应会类似随机的游动，泵引起的偏振烧孔能够被看作是放大器的偏振相关损耗的贡献。从而，在若干个放大器上平均，产生的噪声应是如简单理论预期的那样呈线性。

信号激光器引起的偏振烧孔稍为不一样。信号激光器是沿系统分布，按平行于信号激光器方向偏振的噪声会遇到与信号一样的增益。然而，按与信号激光器正交方向偏振的噪声总是经受更高的增益，因为它总是与信号偏振轴正交。因而，总的噪声沿放大器链路按非线性形式增加。

偏振烧孔引起的总差分增益随着沿放大器链路信号偏振状态的变化(由于偏振模色散)而改变。它之所以改变是因为信号烧孔效应与泵效应相关。当相关的信号和泵激光器的偏振状态变化时,差分增益幅度随之改变。因而,尽管总噪声沿链路非线性增加,它还以这样的方式使总噪声随时间波动。因此,如上所述,信噪比降低而随时间波动。从而,系统的Q值也降低和随时间波动。

### II.4.3.3 使引起的制约减到最小的方法

有几种减小偏振烧孔效应的方法。使放大器在小信号区域工作是一种可能的方法,但这并不总是可行的,在许多情况甚至是不希望的。实际上,最简单的方法是使用去偏振信号。可以有许多方式生成去偏振信号,但是最常用的产生方法是偏振扰乱方式。使用相位调制器,偏振状态会随时间在两个正交状态之间改变。则信号显出已去偏振。

这表明,以双倍的比特率实现偏振调制是最好的方式。这是因为放大器的偏振相关损耗会从偏振调制转变为幅度调制。以双倍的比特率进行偏振调制,幅度波动速率将比检测器带宽更高,从而在接收器发现不了。使用这样的技术,超长途系统的性能会被改善,以高的置信度符合预期的性能要求。现在,偏振调制已成为越洋放大系统的标准实现方法。

然而,在长的放大系统中,偏振模色散会使信号再次偏振,以至偏振烧孔再使系统性能劣化。这种效应表明在放大链路中偏振现象相互作用的复杂性质。

## II.5 光纤色散特性

### II.5.1 色度色散

#### II.5.1.1 效应的描述

色度色散是对传输能力的支配性制约条件,这是由发送光源的光谱特性和光纤的色度色散产生的限制。光放大器本质上不会明显地改变色度色散,除非在放大子系统内结合有色散补偿功能。

光放大器产生在信号发送波长周围的光线,即所谓放大的自发发射(ASE)。通常,ASE分量不受调制,因而它不会与信号同步检出。在许多光放大器实现方法中,ASE被放大器信号通道或接收器内的滤波器抑制。只要ASE与发送信号一道被调制,其结果就是导致如II.6.1更全面说明的光噪声。ASE的宽阔光谱不会改变信号光谱特性与光纤色度色散之间的相互作用。

一般地说,并不会由于将光放大器加进系统而明显地改变总的色度色散特性。在OFA中使用稀土掺杂光纤作有源增益媒质会使色度色散少量增加,但是这些光纤只有几十米乃至几百米长。稀土掺杂光纤的色度色散与G.652, G.653和G.655光纤的差别不大。对于几十到几千公里的系统而言,这点色散贡献不必考虑。



### II.5.1.2 给传输带来的制约

一般地说，光放大器不会改变色度色散引起的限制。由于放大输出的功率电平高，某些非线性效应可能会和光纤色度色散相互作用。在II.3已全面的说明了这些效应和使引入的限制最小化的方法。

光放大器的存在并不影响系统内色度色散。然而，OA使系统要当作长的无再生系统来考虑，在长的无再生系统由于色度色散系统代价会变得很重要。例如，在下列等式成立时<sup>6</sup>，一个零啁啾、单频光源在1550 nm的光功率代价最多可达1 dB左右。：

$$B^2 DL \leq 104,000$$

式中，B是以Gbit/s为单位的比特率，D是以ps/nm-km为单位的色散系数，L是以km为单位的路由总长。

IEC SC86C WG1也在研究与此类似的公式<sup>7</sup>。上述公式适用于线性系统，但在考虑到非线性时可能不正确<sup>8</sup>。这是需要进一步研究的领域。另外，非线性效应和色度色散的相互作用能够产生不得不进行色散补偿的相互作用。这一点能够在具有理想色散量的光纤和它相对于波长是不均匀的条件下实现。

### II.5.1.3 使引起的制约减到最小

光放大器的存在不影响系统内色度色散，因而不需要规定使这些效应降低到最小的方法。在某些光放大系统中，无源的色散补偿功能可能会和光放大器组合在一起形成一个放大子系统，它们会将有限量的与系统光纤符号相反的色度色散添加进系统。其结果就是系统的总色度色散更小。这种功能可能与OA处于同一处，用以克服与无源色散补偿功能相关的损耗。在传输系统中色度色散的这种变化是因为存在无源色散补偿功能(在ITU-T G.690系列建议书有更全面的说明)引起的而不是光放大器带来的。

注一 在ITU-T G.690系列建议书说明使色度色散带来的制约减到最小的附加技术。

## II.6 与OA有关的其他特性

### II.6.1 噪声累积

#### II.6.1.1 效应的描述

在具有级联OA的传输系统，OA产生的ASE噪声与信号光一样地重复循环进行衰减和放大过程。因为输入的ASE噪声在每个OA被放大并添加在那个OA产生的ASE噪声上，总的ASE噪声功率的增大量差不多与OA的数量成正比，而信号功率则相应降低。噪声功率能够超过信号功率。

---

<sup>6</sup> KAMINOW (I.P.), KOCH (T.L.), *ibid.* p. 167.

<sup>7</sup> Draft IEC 61282-5 SC86C WG1, *Guidelines to accommodate and compensate for dispersion in fibre optic systems.*

<sup>8</sup> CHBAT (M.), BIGO (S.), Measurement of the impact of fiber non-linearity on high data rate dispersion managed WDM systems, *Symposium on Optical Fiber Measurements*, NIST (USA), September 1998.

ASE噪声频谱分布曲线也是随系统长度演变。当ASE噪声从第一个OA输出到第二个OA时，由于增益饱和和效应引起的ASE噪声功率使第二个OA的增益分布曲线变化。类似地，第二个OA的输出功率频谱则会修改第三个OA的有效增益分布曲线。这种效应同样地往下传递直到最后一个OA。甚至在每个OA都使用窄带滤波器ASE噪声仍会累积，因为噪声存在于包括信号频率的整个频率范围内。

### II.6.1.2 给传输带来的制约

接收信号的SNR主要会由于ASE相关的差拍噪声而劣化，所以ASE噪声积累影响系统的SNR。这种差拍噪声随OA的数目线性增加。因此，差错比随OA的数目增多而变坏。另外，噪声按放大器增益的幅度指数积累。

由于OA增益频率的作用，在经过许多个OA之后的ASE噪声频谱会由于自滤波效应(将在II.6.2说明)在某个波长形成峰值。特别是，如考虑闭合全光环网络体系，ASE噪声就会像有无限个放大器级联那样积累。尽管在滤波系统内ASE噪声积累被滤波器降低了很多，但带内ASE仍会随级联的OA的数目增加而增加。因此，SNR会随OA数量增加而劣化。

### II.6.1.3 使噪声积累减到最小

减小OA的间距(但保持总增益等于传输通道的总损耗)能够降低ASE噪声积累，因为ASE噪声按放大器增益幅度的指数关系积累。下列滤波技术之一能够进一步降低不希望的ASE噪声效应：使用ASE噪声滤波器，或利用自滤波效应(自滤波方法)。

自滤波方法适用于有几十个或更多OA的系统。在这个方法中，使信号波长与自滤波波长一致，使检测器接收的ASE噪声降低，犹如使用窄带滤波器一样。当采用缩短OA间距和低增益OA时，这是降低初始ASE噪声最有效的方法。

若考虑全光WDM闭合环网，自滤波方法不适用。事实上，在OA的整个增益频谱上产生的峰值可能严重地影响系统性能。在这种情况下，使用ASE滤波器方法能够使ASE噪声累积最小。这是采用对不供该网络节点使用的WDM通路在转换出该节点之前进行滤波的方法而获得的。

对于具有少量OA的系统，自滤波方法比ASE滤波器方法的效果差。ASE滤波器方法能够灵活地选择信号波长并具有其他优点(参见II.6.2)。滤波器特性必须小心选择，因为级联的滤波器通带比单个滤波器更窄(除非它具有矩形频谱通带)。通常的在半最大幅值的全宽度(FWHM)为3nm量级的滤波器可用于长途单通路系统。

## II.6.2 自滤波效应

### II.6.2.1 效应的描述

由于无滤波系统内ASE噪声的累积，ASE频谱(或总增益谱)的特性曲线会有峰值。该峰值的谱线宽度随OA数量增加而变窄，在OA数量达到某个值之后它最终饱和而不再变窄。在数十个OA之后，可能形成仅有2~3 nm宽的谱线。这个效应称为自滤波。

发射和吸收交叉部分的光谱形状和OA反演的程度确定自滤波效应。自滤波的波长会随基质玻璃的成分、输入光功率、或放大器间的损耗和它们与波长的关系、泵波长和掺杂光纤的长度而改变。一般可以认为在单通路系统内希望有自滤波效应(如II.6.1.3所述),但在多通路系统是不希望的。

### II.6.2.2 给传输带来的制约

对于具有有限数目OA的系统,自滤波增益峰的频谱宽度不会变窄就不会降低ASE噪声积累,即使将信号波长调节到峰值波长上也无用。在有許多OA和良好地形成自滤波增益峰的系统,SNR能够很高,但在信号波长偏离自滤波波长时又可能很坏。在系统重新配置或维修之后,由于放大器之间损耗改变就会出现这种偏离情况。

具有级联OA的多通路系统会因为通路中功率的变化而受到损伤,该功率随OA的数目按指数增加(OA的数目为指数)。例如,对一个5通路系统,第一个掺饵光纤放大器(EDFA)之后功率弥散约3 dB,在第六个EDFA之后增加到约15 dB。对于多通路系统,通路总数的变化会引起要干扰其他通路的增益—频谱改变。饱和和引起的与频谱相关的增益也产生通路中的增益变化。

因而,必须当心设计损耗预算裕度,以便适应滤波和不滤波两类系统的EDFA增益频谱变化。该问题使用ASE滤波器来避免,如II.6.2.3所述。

### II.6.2.3 处理自滤波效应的方法

本节讨论利用OA自滤波效应和ASE噪声滤波器改善系统性能。

当最佳色散波长、自滤波波长和信号波长一致时,使用自滤波方法改善SNR最有效。这个方法不需要使用ASE噪声滤波器,ASE噪声滤波器会引起与滤波器的偏振相关损耗有关的劣化。在越洋海底系统中这是特别有好处的。另一方面,对自滤波效应的依赖会使系统设计、重新配置和维修变得复杂,因为信号波长必须总是与可能改变的自滤波波长一致。OA的增益和放大器间的损耗的频谱特性应尽可能相同。另外,自滤波增益峰不可能变得足够窄,从而SNR的改善不足,并使在长途系统中ASE噪声引起饱和的防止变得困难。

为避免这些缺点,能够使用ASE滤波器方法,将滤波器的通带调节到信号频率降低ASE积累。通常可用FWHM < 1 nm的窄带滤波器。这样ASE噪声积累可减到最小,系统也不再具有诸如系统设计、重新配置和维修上的复杂性,以及要求OA间距短和每个OA性能相同等约束条件了。

在多通路系统,用物理上分离的OA放大每个通路能够避免自滤波效应引起的通路间功率弥散。但是,这种方法要求价昂的分用器,分离的OA和复用器。一种替代办法是在每个网络节点提供光通路功率均衡,尽管这个方法要求附加的控制电子设备和更严格的全网功率预算。一种补充的方法是采用低饱和或低强度反转的OA,因为这样能使衰减的波长相关性变小,从而减小通路间功率弥散。然而,在强度反转的EDFA级联中,在1530nm左右的第一个增益峰按EDFA的数目生成的ASE需要用短波长消除滤波器消除。另外,采用预加权方法按照接收的来自终端的信号调节每个通路的发送光功率,使所有通路的SNR差最小。

## II.6.3 光浪涌的发生

### II.6.3.1 效应的描述

当在充分泵激励的EDFA中光输入功率迅速增大时，由于EDFA增益动态过程缓慢而出现光浪涌。特别是输出功率控制EDFA，很可能出现光浪涌。这是因为这种EDFA的泵功率随光输入功率减小而增大，在输入功率突然恢复时就会产生光浪涌。图II.6-1表明光浪涌的发生。

在重新连接一个常用的连接器时，光功率的上升时间(10-90%)约为0.3ms，它短得足以产生光浪涌。然而，如果EDFA在光学上已饱和，附加的快速增加的光输入功率可能不会产生明显的光浪涌。

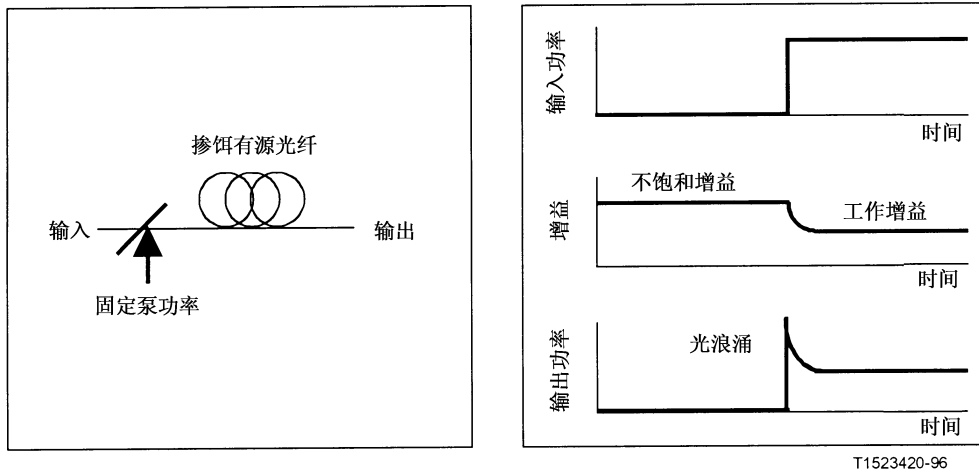


图 II.6-1/G.663-光浪涌产生的例子

### II.6.3.2 给传输带来的制约

在EDFA级联情况，在特殊条件下，光浪涌的峰值功率能够达到几瓦，可能危及O/E变换器，和/或电的前置放大器和光元件，包括光连接器的端面。光浪涌也会伤害人眼。已经发现对沾有污物的光连接器端面产生伤害的光功率门限值大约是20 dBm。

### II.6.3.3 使浪涌产生的效应减到最小

防止光浪涌可以考虑采用以下功能：

- 1) 当检测到输入信号丢失时，降低或关断送到EDFA的泵功率；
- 2) 在检测出输入信号恢复后，恢复送到EDFA的泵功率。在这方面，重新激活泵激光器的功率使它达到它的标值的过程应当是渐进的并应规定相关的最小激活时间。

图II.6-2表示出防浪涌的一种配置示例，其中信号丢失检测单元控制泵激光器的开/关状态。在信号丢失的时间要比EDFA的增益动态过程的时间短许多，例如，<1 ms的情况，泵激光器功率必须保持不变。

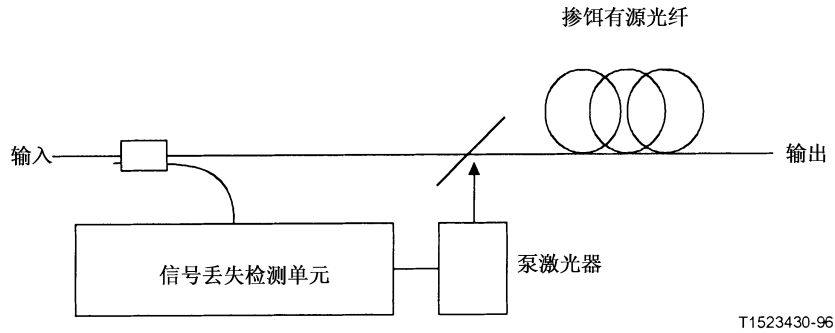


图 II.6-2/G.663-防浪涌系统示例

## II.6.4 SOA中非线性诱发的饱和

### II.6.4.1 效应的描述

半导体光放大器(SOA)受到独特类型的非线性特性的损伤，这一切与SOA的快速增益动态过程和典型半导体放大媒质的幅度—相位耦合的组合作用有关。

这种关于随饱和引起的非线性而穿通的现象，由于SOA的载流子寿命 $\tau_c$  (0.2-0.5 ns)与传输的光脉冲宽度差不多，会影响使用SOA的通信系统的性能。事实上，SOA的增益会如此快地饱和以致光脉冲的前沿和后沿受到不同的增益。饱和的时域展开通常取决于脉冲的时域轮廓，反之增益压缩的程度取决于与SOA饱和能量相比的脉冲能量( $E_{sat} = P_{sat} \tau_c$ ，式中典型的SOA饱和功率的内在值是30 mW – 不要和较低的3 dB饱和功率，10-15 mW相混淆)。下列公式规定了这种特性：

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma_0 - \Gamma}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{E_{sat}} \{ \exp(\Gamma) - 1 \}$$

式中， $\Gamma(t)$ 是在SOA长度积分的增益系数， $\Gamma_0$ 是SOA的不饱和积分增益， $P_{in}(t)$ 是光信号的时域轮廓。SOA的增益用 $G(t) = \exp[\Gamma(t)]$ 给出。

因为 $P_{out}(t) = G(t) P_{in}(t)$ ，所以从放大器输出的光信号因不同的增益而失真。这种性质能够引起光数据序列的脉型效应，因为脉冲受到的增益会因在它前面的那个比特是逻辑上的“符号”还是“间隔”而不同。要着重指出这种现象能够在每种类型的激光器放大器(包括EDFA)中出现，但是，在SOA中增益饱和和时间标度与光比特的时间长度可以相比。

SOA独特的方面是放大的脉冲还有啁啾和频偏，因为典型半导体媒质的幅度—相位耦合。其原因是输入SOA脉冲的光功率耗尽载流子粒子，从而改变了半导体空腔的折射率。其结果是脉冲相位按下式动态地改变：

$$\phi_{out}(t) = \phi_{in}(t) - \frac{1}{2} \beta_c \Gamma(t)$$

式中， $\beta_c$ 是线增强因子，该参数衡量幅度—相位耦合强度(对于SOA典型值4-6)。将上述公式对时间微分并考虑到 $\Gamma(t)$ 的公式得出瞬时频移。这种现象称为饱和引起的自相位调制(SI-SPM)<sup>9</sup>。当与光纤色度色散结合时，SI-SPM会变得很有害。

#### II.6.4.2 给传输带来的制约

采用NRZ发送器的常规单通路点到点光系统主要是被脉型效应损伤，在较小程度上，被SOA引起的脉冲啁啾<sup>10</sup>影响。脉型效应也能够影响RZ脉冲的传输，在这种情况下，如脉冲功率足够大，脉冲的频移也可能起到相关的作用。当光纤的色散在工作波长不为零时，频移转换成时间抖动，它能够破坏原始的比特序列，从而给系统设定了能够达到的极限。在使用非线性传输技术，例如光孤子时，这个效应可能起决定性的作用，因为对于孤子脉冲能量应维持大而色散又不是零(反常色散)<sup>10, 11</sup>。

#### II.6.4.3 使引入的限制减到最小的方法

饱和引起的非线性是SOA固有的性质。使SOA在线性区运用或使用增益箝制技术能够避免它。在第一种情况，应注意沿光链路的ASE积累；在每个放大器后使用光滤波器能够有效地避免ASE积累产生的静态增益饱和效应。在另一方面，增益箝制降低可用增益。试验已证实；保持平均功率低(1-5 mW)和色散接近零，长达400 km的NRZ和RZ系统的性能仍能保持良好<sup>11, 12</sup>。在长途孤子系统中SI-SPM引起的损伤能够使用合适的滤波技术(滑动滤波器)<sup>11</sup>加以缓解。

## 附录 III

### 前置放大器

本附录的内容是前置放大器相关特性参数的定义，该定义允许利用标准公式求得能保证在终端接收设备(TRE)达到BER=10<sup>-12</sup>的最小输入功率。

根据对光放大器噪声的理论研究和实验测试，能够用来获得能保证在TRE的BER = 10<sup>-12</sup>的最小输入功率的相关PA特性参数是：

- 最大小信号增益 "GMax" (ITU-T G.661 [6]);
- 小信号增益 "G" (ITU-T G.661);
- 信号—自发噪声指数 "NFs-sp" (ITU-T G.661);

<sup>9</sup> AGRAWAL (G.P.), OLSSON (N.A.), *Quantum Electron.*, Volume 25, pp. 2297-2306, 1989.

<sup>10</sup> SETTEMBRE (M.) *et al.*, *J. Wavelength Technol.*, Volume 15, pp. 962-967, 1997.

<sup>11</sup> MECOZZI (A.), *Optics Letters*, Volume 20, pp. 1616-1618, 1995.

<sup>11</sup> REID (J.J.E.) *et al.*, Proc. of ECOC'98, Volume 1, pp. 567-568, Madrid (Spain), 1998.

- 噪声指数 "NF" (ITU-T G.661);
- (等效)自发-自发差拍噪声光带宽( $B_{sp-sp}$ ) (ITU-T G.661)。

最佳放大器(没有内部反射噪声)噪声,除了信号散粒噪声和自发发射噪声的贡献之外,起控制作用的有两个主要分量。这两个主要分量是信号-自发差拍噪声和自发-自发差拍噪声。

注一 输出噪声的项目可分为五类:

- a) 放大的输入信号引发的散粒噪声;
- b) 放大的自发发射(ASE)引发的散粒噪声;
- c) 信号与ASE混频引发的信号-自发差拍噪声;
- d) ASE自身的混频引发的自发-自发差拍噪声;
- e) 反射噪声。

每种噪声的贡献能够用部分噪声因子"F"的形式表示,总的噪声指数就是全部各个贡献的总和。总的噪声因子(线性的而不是对数的单位)为:

$$F_{total} = F_{shot-sig} + F_{shot-ASE} + F_{sig-sp} + F_{sp-sp} + F_{refl}$$

这个公式能够用于评估由光测量获得的噪声因子,以及估算如增益、反射、光源谱线宽度和基带频率等参数的波动。它表示OFA的完整噪声因子模型。

在这些条件下,利用标准公式可以获得总噪声因子的如下表达式:

$$F = F_{s-sp} \left( 1 + \frac{h\nu n_{sp} B_{sp-sp}}{2P_{in}} \frac{G-1}{G} \right)$$

式中,

$$F_{s-sp} = 2n_{sp} \left( \frac{G-1}{G} \right) \text{ and } n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

$h\nu$ 是信号光子能量,  $P_{in}$ 是PA输入点功率,  $n_2$ 是激励水平的粒子密度,  $n_1$ 是基准水平的粒子密度,  $G$ 和  $B_{sp-sp}$ 在前面已有定义。显然,  $F$ 会因  $B_{sp-sp}$  之值降低而降低,但为了和现有ITU-T G.957 [14]兼容,要将它的值限定在1 nm ( $\approx 120$  GHz)的量级。在TRE的SNR由以下公式给出:

$$SNR = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F + \frac{NR_x}{P_{in} G^2}}$$

式中,  $m$ 是调制深度  $\left(1 - \frac{1}{\text{消光比}}\right)$ ,  $B$ 是接收器的电带宽(与比特率成正比),  $NR_x$ 是TRE等效噪声。由前面两个公式能够得出在TRE的BER= $10^{-12}$ 情况下PA的最低输入功率。显然,最佳PA必须有足够高的增益,这样才能使TRE的噪声贡献与前置放大器的贡献相比可以忽略。在整个输入功率范围内必须保持能使BER优于 $10^{-12}$ 的SNR值。从噪声方面看,PA的特性要用小信号增益( $G$ ),信号-自发发射对噪声因子的贡献( $F_{s-sp}$ )和自发-自发差拍噪声等效带宽( $B_{sp-sp}$ )等参数来规定。为了确认PA没有受到内部反射噪声贡献的影响,验证PA的总噪声指数是重要的。

## 示例

对一个接收器装设有PA，能够保证在2.5Gbit/s SDH-TRE点的BER=10<sup>-12</sup>的情况，计算SNR比

根据前面的考虑和定义的参数，在PA的输出点的SNR可用下式计算：

$$SNR_{(PA)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F}$$

在上面的公式中，没有考虑散粒噪声的贡献，因为在给定小信号增益为20 dB条件下与差拍噪声分量相比它可以忽略。这个公式假定最坏情况的近似，这就是认为在“0”上的噪声等于是在“1”上的噪声（“0”不存在信号—自发差拍噪声）和输出噪声是高斯型。

利用上述公式很容易求得PA的灵敏度。

在上述公式的除数中加上 $\frac{N_{R_x}}{P_{in}G^2}$ 项，这里 $N_{R_x}$ 是TRE等效噪声，得出整个接收器(PA+TRE)的总灵敏度

度

$$SNR_{(PA+TRE)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot F + \frac{N_{R_x}}{P_{in}G^2}}$$

然而，当增益G值足够大时 $\frac{N_{R_x}}{P_{in}G^2}$ 项显然可以忽略。考虑到与ITU-T G.957 [14]中关于2.5Gbit/s TRE在

BER = 10<sup>-12</sup>时最小灵敏度为-26 dBm的兼容性以及先前考虑的PA的特性参数：

- |  |               |
|--|---------------|
| - 最大小信号增益                                  | 24 dB         |
| - 小信号增益(G)                                 | ≥20 dB        |
| - 信号-自发噪声指数( $NF_{s-sp}$ )                 | ≤5.5 dB       |
| - 可用信号波长宽度( $B_{s-sp}$ )                   | 1 nm(0.8-1.2) |
| - 信噪比(SNR)[在TRE的BER = 10 <sup>-12</sup> 时] | 3 dB          |
| - 光源消光比                                    | 8.2 dB        |



- TRE通带宽度(接收器的电带宽, 与比特率值成正比) $B=f_{Nyquist}(1+\ell)$ ; 式中 $f_{Nyquist}=(\text{比特率})/2=(2.5\text{Gbit/s})/2$ ,  $\ell$  是奈奎斯特通路的滚降系数, 在0到1之间变化
 

}	最小值 = $\frac{2.5}{2}$ GHz
	平均值 = $\frac{2.5}{2} \cdot 1.5$ GHz
	最大值 = 2.5 GHz

对于接收器信号值为-16 dBm, TRE噪声的贡献能够忽略不计, 是容易证实的。利用先前考虑的参数值, 得出在TRE的BER= $10^{-12}$ 时最小输入功率为-36 dBm。因为在计算时引入了最坏情况的假设, 可以认为这个值已包括了裕度。因此, 对最大增益值, PA输出的信号将是-12 dBm, 可以认为PA的灵敏度就是整个接收器(PA+TRE)的灵敏度。就PA而言, 在最小增益工作条件(小信号增益, G=20 dB), PA输出的平均光功率将是-16 dBm, 也可以认为PA的灵敏度就是整个接收器(PA+TRE)的灵敏度。

使用前述的值和公式, 也可以计算出: 在不使用线路放大器的配置, 前置放大器输入功率电平低到-43 dBm时前置放大器输出SNR比还能达到13 dB以上。

## 附录 IV

### OA的OAM特征

以下给出OA子系统和器件可能的一般OAM特征。

#### IV.1 OA子系统

因为从维护的角度看OAT和OAR与常规的发送器和接收器没有区别, 所有相关的运行、管理和维护(OAM)特征与ITU-T G.783 [12]中关于发送器和接收器的规范是一样的。

#### IV.2 OA器件

下列OAM状态能够作为提交给相关管理系统的信息:

- OA信号丢失(LOS), 指示可能的输入信号丢失(传输缺陷);
- OA失效, 指示光放大器不再能实现它的基本光放大功能(设备缺陷);
- OA处于关断状态(输出状态)。

这种方式使得提供给使用者的信息是关于设备和/或光缆设施能够区分开来。另外, 为了能将光功率电平限制在光安全条件要求的水平, OA能具备“使能/禁止输出”控制信号。

注 — 诸如(在有线路放大器情况下)“OA劣化”或“光监测通路丢失”等设备故障的更多资料的使用方面尚待研究。





## ITU-T 建议书系列

A系列	ITU-T工作的组织
B系列	表述方式：定义、符号和分类
C系列	综合电信统计
D系列	一般资费原则
E系列	综合网络运行、电话业务、业务运行和人为因素
F系列	非话电信业务
G系列	<b>传输系统和媒质、数字系统和网络</b>
H系列	视听及多媒体系统
I系列	综合业务数字网
J系列	电视、声音节目和其他多媒体信号的传输
K系列	干扰的防护
L系列	电缆和外部设备其他组件的结构、安装和保护
M系列	TMN和网络维护：国际传输系统、电话电路、电报、传真和租用电路
N系列	维护：国际声音节目和电视传输电路
O系列	测量设备技术规程
P系列	电话传输质量、电话安装及本地线路网络
Q系列	交换和信令
R系列	电报传输
S系列	电报业务终端设备
T系列	远程信息处理业务的终端设备
U系列	电报交换
V系列	电话网上的数据通信
X系列	数据网和开放系统通信
Y系列	全球信息基础设施和互联网的协议问题
Z系列	用于电信系统的语言和一般软件问题