

国际电信联盟

ITU-T

国际电信联盟
电信标准化部门

G.696.1

(07/2005)

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

纵向兼容的域内**DWDM**应用

ITU-T G.696.1建议书

ITU-T



国际电信联盟

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
在无线电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
无线电与线路电话的协调	G.450-G.499
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
光部件和子系统的特性	G.660-G.699
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
服务质量和性能 — 一般和与用户相关的概况	G.1000-G.1999
传输媒质的特性	G.6000-G.6999
数字终端设备	G.7000-G.7999
数字网	G.8000-G.8999
接入网	G.9000-G.9999

欲了解更详细信息，请查阅ITU-T建议书目录。

纵向兼容的域内DWDM应用

摘 要

本建议书提供域内（IaD）DWDM光网络应用的物理层规范。说明点到点、有或没有线路放大器的多路系统系统在单一管理区域内纵向兼容的应用。本建议书中的应用代码给出一组DWDM传输系统和光纤链路的分类。主要目的是让多个供应商能遵从本建议书设计光纤链路用DWDM传输设备。

来 源

ITU-T 第15 研究组（2005-2008）按照 ITU-T A.8 建议书规定的程序，于2005年7月14日批准了ITU-T G.696.1（2005年）建议书。

前 言

国际电信联盟（ITU）是从事电信领域工作的联合国专门机构。ITU-T（国际电信联盟电信标准化部门）是国际电信联盟的常设机构，负责研究技术、操作和资费问题，并且为在世界范围内实现电信标准化，发表有关上述研究项目的建议书。

每四年一届的世界电信标准化全会（WTSA）确定 ITU-T 各研究组的研究课题，再由各研究组制定有关这些课题的建议书。

WTSA 第 1 号决议规定了批准建议书须遵循的程序。

属 ITU-T 研究范围的某些信息技术领域的必要标准，是与国际标准化组织（ISO）和国际电工技术委员会（IEC）合作制定的。

注

本建议书为简要而使用的“主管部门”一词，既指电信主管部门，又指经认可的运营机构。

遵守本建议书的规定是以自愿为基础的，但建议书可能包含某些强制性条款（以确保例如互操作性或适用性等），只有满足所有强制性条款的规定，才能达到遵守建议书的目的。“应该”或“必须”等其它一些强制性用语及其否定形式被用于表达特定要求。使用此类用语不表示要求任何一方遵守本建议书。

知识产权

国际电联提请注意：本建议书的应用或实施可能涉及使用已申报的知识产权。国际电联对无论是其成员还是建议书制定程序之外的其它机构提出的有关已申报的知识产权的证据、有效性或适用性不表示意见。

至本建议书批准之日止，国际电联尚未收到实施本建议书可能需要的受专利保护的知识产权的通知。但需要提醒实施者注意的是，这可能不是最新信息，因此大力提倡他们查询电信标准化局（TSB）的专利数据库。

© 国际电联 2005

版权所有。未经国际电联事先书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

目 录

	页
1 范围.....	1
2 参考文献.....	1
2.1 规范性参考文献.....	1
2.2 资料性参考文献.....	2
3 术语和定义.....	2
3.1 定义.....	2
3.2 在其他建议书中规定的术语.....	3
4 缩写.....	3
5 光接口分类.....	4
5.1 应用.....	4
5.2 参考配置.....	4
5.3 命名法.....	5
6 纵向兼容性.....	6
7 参数.....	6
7.1 每段最大和最小衰减.....	6
7.2 光纤类型.....	7
7.3 工作波长范围.....	7
7.4 每段最小和最大颜色色散.....	7
7.5 最小本身颜色色散系数.....	8
7.6 最大颜色色散偏离.....	8
7.7 最大微分群延迟.....	8
7.8 在 MPI-S _M 或 S _M 的最小光回损.....	10
7.9 MPI-S _M 和 MPI-R _M 之间最大离散反射.....	10
8 光的安全性考虑.....	10
附录 I — DWDM 系统的理论极限和设计考虑.....	11
I.1 能使用的技术及其限制.....	11
I.2 限制传输距离的其他效应.....	14
I.3 用来减轻损伤的技术.....	16
I.4 实例.....	17
参考资料.....	19

纵向兼容的域内DWDM应用

1 范围

本建议书提供域内（IaD） DWDM光网络应用的物理层规范。这些规范供点到点、有或没有线路放大器的多路线路系统使用。其目的是使在一个管理域内能够采取纵向兼容的应用。主要目的是使多个供应商能提供符合本建议书的光纤链路传输设备。

为了给IaD应用规范提供一个框架，本建议书包括了物理层应用的通用参考模型。规范按应用代码组织，应用代码考虑到诸如光放大器的工作波长范围、组成的通路个数、客户等级、段的距离、光纤类型及系统配置。

这个初步的建议书集中讨论没有介入光交换单元的IaD应用。希望今后的版本和/或其他新的建议书能提出更复杂的物理层配置和/或支持更高层的兼容性。对于这些应用，可能需要超出点对点配置的那些规范。

本建议书假定在光通路内传送的光支路信号是数字的而不是模拟的。能够传送模拟光支路信号的系统的规范尚待研究。

2 参考文献

2.1 规范性参考文献

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面临修订，使用本建议书的各方应探讨使用下列建议书和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。本建议书中引用某个独立文件，并非确定该文件具备建议书的地位。

- ITU-T Recommendation G.650.2 (2005) , *Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.652 (2005) , *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.653 (2003) , *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.654 (2004) , *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.655 (2003) , *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.663 (2000) , *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems plus Amendment 1 (2003) , Amendments to Appendix II.*

- ITU-T Recommendation G.664 (2003), *Optical safety procedures and requirements for optical transport systems plus Amendment 1 (2005)*.
- ITU-T Recommendation G.665 (2005), *Generic characteristics of Raman amplifiers and Raman amplified subsystems*.
- ITU-T Recommendation G.691 (2003), *Optical interfaces for single-channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers plus Amendment 1 (2005)*.
- ITU-T Recommendation G.707/Y.1322 (2003), *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH) plus Amendment 1 (2004) and Corrigendum 1 (2004)*.
- ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (2003), *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN) plus Amendment 1 (2003)*.
- ITU-T Recommendation G.872 (2001), *Architecture of optical transport networks plus Amendment 1 (2003) and Corrigendum 1 (2005)*.
- ITU-T Recommendation G.957 (1999), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy plus Amendment 1 (2003) and Amendment 2 (2005)*.
- ITU-T Recommendation G.959.1 (2003), *Optical transport network physical layer interfaces*.
- IEC 60825-1 (2001), *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*.
- IEC 60825-2 (2005), *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*.
- IEC/TR 61292-4 (2004) *Optical amplifiers – Part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers*.

2.2 资料性参考文献

- ITU-T Recommendation G.975.1 (2004), *Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems*.
- ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39 (2003), *Optical system design and engineering considerations*.

3 术语和定义

3.1 定义

本建议书采用下列术语：

3.1.1 client class 客户等级：客户等级提示在跨过光网络传送用的光通路之内的单个光分支信号的客户信号比特率等级。在本建议书的文本中，客户比特率是添加任何附加FEC字节之前的连续数字信号比特率。就遵从ITU-T G.707/Y.1322建议书的信号而言，这就是ODUk的比特率。

3.1.2 client class 1.25G 客户等级1.25G：适用于客户比特率从标称的622 Mbit/s到标称的1.25 Gbit/s的连续数字信号。客户等级1.25G包括遵从ITU-T G.707/Y.1322建议书的STM-4比特率的信号。

3.1.3 client class 2.5G 客户等级2.5G：适用于客户比特率从标称的622 Mbit/s到标称的2.5 Gbit/s的连续数字信号。客户等级2.5G包括遵从ITU-T G.707/Y.1322建议书的STM-16比特率和遵从ITU-T G.709/Y.1331建议书的ODU1比特率的信号。

3.1.4 client class 10G 客户等级10G: 适用于客户比特率从标称的2.4 Gbit/s到标称的10.5 Gbit/s的连续数字信号。客户等级10G包括遵从ITU-T G.707/Y.1322建议书的STM-64比特率和遵从ITU-T G.709/Y.1331建议书的ODU2比特率的信号。

3.1.5 client class 40G 客户等级40G: 适用于客户比特率从标称的9.9 Gbit/s到标称的42 Gbit/s的连续数字信号。客户等级40G包括遵从ITU-T G.707/Y.1322建议书的STM-256比特率和遵从ITU-T G.709/Y.1331建议书的ODU3比特率的信号。

3.2 在其他建议书中规定的术语

本建议书采用在ITU-T G.872建议书中规定的下列术语:

- 域内接口 (IaDI) ;
- 3R再生。

在ITU-T G.709/Y.1331建议书中规定的下列术语:

- 光通路数据单元 (ODUk) 。

在ITU-T G.959.1建议书中规定的下列术语:

- 光支路信号。

4 缩写

本建议书采用下列缩写:

3R	(再生)再放大、再整形和再定时
ASE	放大的自发发射
BER	比特差错比
DCM	色散补偿模块
DEMUX	分用器
DGD	微分群延迟
DRA	分布式拉曼放大
DWDM	密集波分复用
EDFA	掺饵光纤放大器
FEC	前向纠错
FWM	四波混合
IaD	域内
IaDI	域内接口
MPI	主通道接口
MUX	复用器
NCG	净编码增益
NRZ	不归零
OA	光放大器
ODUk	光通路数据单元 (k = 1, 2 或 3)

OPM	光功率监测器
OSA	光谱分析器
OSNR	光信噪比
PDG	偏振相关增益
PDL	偏振相关损耗
PMD	偏振模色散
PMD _Q	链路PMD的统计参数
RZ	归零
SPM	自相位调制
VOA	可变光衰减器
WDM	波分复用
XPM	交叉相位调制

5 光接口分类

5.1 应用

本建议书提出有或没有光线路放大器的纵向兼容的域内DWDM应用。可以使用不同类型的线路放大器，实际上是如ITU-T G.663建议书所述独立的线路放大器或遵从ITU-T G.665建议书的拉曼放大器。

5.2 参考配置

对本建议书而言，在图5-1示出适用于域内DWDM接口应用的相关参考点。

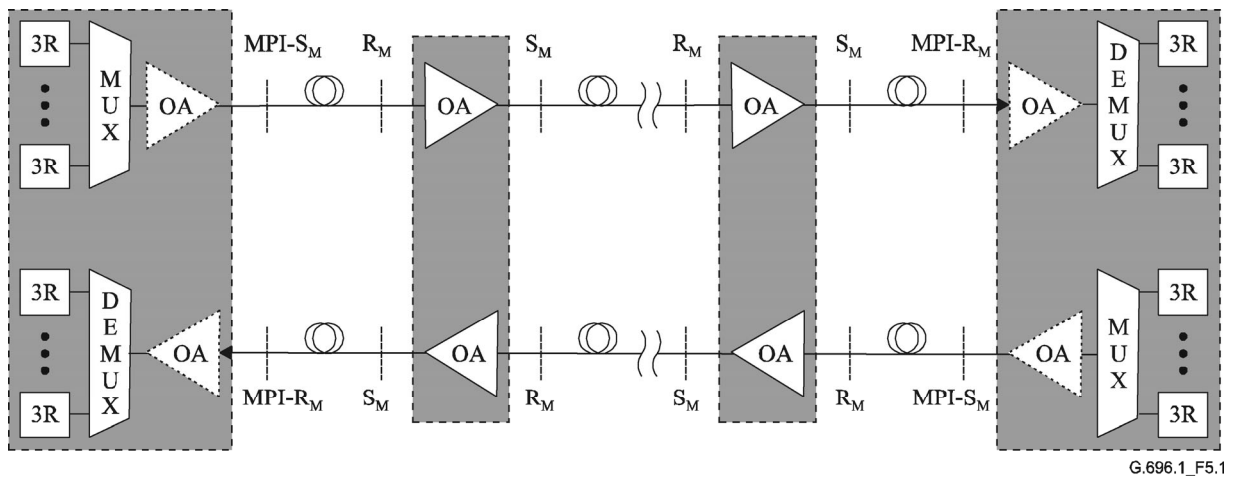


图 5-1/G.696.1 – 多段DWDM系统的参考配置

图5-1内参考点定义如下，采用和ITU-T G.959.1建议书同样的命名：

- MPI-S_M是光纤上位置正好在光网络单元传送接口输出光连接器之后的（多路）参考点；
- MPI-R_M是光纤上位置正好在光网络单元传送接口输入光连接器之前的（多路）参考点；
- S_M是位置正好在线路多路OA输出光连接器之后的参考点；
- R_M是位置正好在线路多路OA输入光连接器之前的参考点。

5.3 命名法

应用代码的标志构成如下：

n.B-xWF (s)

其中，

- n** 是应用代码支持的最大通路数，
- B** 指示客户等级：
 - 1.25G 指示客户比特率范围622 Mbit/s - 1.25 Gbit/s；
 - 2.5G 指示客户比特率范围622 Mbit/s - 2.5 Gbit/s；
 - 10G 指示客户比特率范围2.4 Gbit/s - 10.5 Gbit/s；
 - 40G 指示客户比特率范围9.9 Gbit/s - 42 Gbit/s。
- x** 是应用代码内段数，
- W** 是指示段衰减的字母，如
 - S** 指示短距离（段衰减最大11 dB），
 - L** 指示长距离（段衰减最大22 dB），
 - V** 指示很长距离（段衰减最大33 dB），
- F** 是（完整的）光纤类型，例如在应用代码内分别用"652A" ... "652D"表示G.652.A, ... G.652.D。
- S** 指示用波段（见ITU-T 增补 G.39）表示的工作波长范围：

s	描述符	范围 (nm)
O	原始的	1260 到 1360
E	扩展的	1360 到 1460
S	短波长	1460 到 1530
C	常规的	1530 到 1565
L	长波长	1565 到 1625

如果使用一个以上波段，s就变成用"+"号隔开的各个波段的字母组合，例如需要使用C和L波段的应用，s就是"C+L"。

对于拉曼放大的DWDM传输系统，就在应用代码的结尾添加字母"R"，写成：

n.B-xWF (s) R

一个具体应用的例子是：

40.10G-20L652A(C)R

这个应用是10 G净荷等级信号的40路系统，20个使用拉曼放大器的G.652A光纤长距离段。工作波长范围为C波段。

6 纵向兼容性

本建议书涵盖的应用是按ITU-T 增补G.39纵向兼容的。

7 参数

本建议书采用的应用代码（n.B-xWF(s)）由两个分开的段组成。第一部分"n.B"与光传输系统有关，第二部分"xWF(s)"与光纤基础设施有关。

因为本建议书涵盖纵向兼容系统，在表7-1所列的参数只与光纤基础设施有关，而没有应用代码中有关系统的部分影响光纤要求的内容。

表 7-1/G.696.1 – 域内DWDM应用的光纤参数

参 数	章 节
每段最大衰减	7.1
每段最小衰减	7.1
光纤类型	7.2
工作波长范围	7.3
每段最小颜色色散	7.4
每段最大颜色色散	7.4
最小本身色散系数	7.5
最大颜色色散偏离	7.6
最大微分群延迟	7.7
在 MPI-S _M 或 S _M 最小光回损	7.8
MPI-S _M 与 MPI-R _M 之间最大离散反射	7.9

7.1 每段最大和最小衰减

表7-2给出每段最大和最小衰减。

表 7-2/G.696.1 – 最大和最小段衰减

参 数	单 位	应用代码中"W" 的值		
		S	L	V
每段最大衰减	dB	11	22	33
每段最小衰减	dB	ffs	11	22

7.2 光纤类型

本建议书涵盖ITU-T G.65x系列建议书中所有的光纤类型。表7-3给出当前包含的类型。

表 7-3/G.696.1 – 光纤类型

G.652.A	G.653.A	G.654.A	G.655.A	G.656
G.652.B	G.653.B	G.654.B	G.655.B	
G.652.C		G.654.C	G.655.C	
G.652.D				

7.3 工作波长范围

工作波长范围由一个或几个ITU-T 增补G.39规定的波段组成。见表7-4。

表 7-4/G.696.1 – 波长范围

s	描述符	范围 (nm)
O	原始的	1260 到 1360
E	扩展的	1360 到 1460
S	短波长	1460 到 1530
C	常规的	1530 到 1565
L	长波长	1565 到 1625

7.4 每段最小和最大颜色色散

每段最小和最大颜色色散（除去任何色散补偿）可以用标准光纤参数（由G.65x系列查出）计算出来，或者是测量得出。对于有许多段的40G和10G系统，测量经常是更实际的选择。

从G.65x系列建议书查出光纤参数加上本建议书采用的附加参数能够完成每段最小和最大颜色色散的计算。详细的计算如下：每段最大颜色色散 $CD_{\max}^{(\text{段})}$ 由下式给出：

$$CD_{\max}^{(\text{段})} = D_{\max}(s) \cdot L_{\max}^{(\text{段})}$$

其中：

$$L_{\max}^{(\text{段})} = \frac{A_{\max}(W)}{\alpha(s)}$$

是最大段长， $A_{\max}(W)$ 是字母"W"规定的最大段衰减（见表7-2）， $\alpha(s)$ 是工作波长范围"s"（见5.3）内ITU-T G.65x系列建议书规定的“典型链路值”。 $D_{\max}(s)$ 表示工作波长范围"s"内最大色散系数。

类似地，每段最小颜色色散 $CD_{\max}^{(\text{段})}$ 由下式给出：

$$CD_{\min}^{(\text{段})} = D_{\min}(s) \cdot L_{\min}^{(\text{段})}$$

其中：

$$L_{\min}^{(\text{段})} = \frac{A_{\min}(W)}{\alpha(s)}$$

是最小段长， $A_{\max}(W)$ 是字母"W"规定的最小段衰减（见表7-2）， $\alpha(s)$ 是工作波长范围"s"（见5.3）内ITU-T G.65x系列建议书规定的“典型链路值”。 $D_{\min}(s)$ 表示工作波长范围"s"内最小色散系数。

对ITU-T G.65x系列建议书内任何光纤类型使用“链路属性”能够查到颜色色散系数。表7-2规定了最大和最小段衰减。

7.5 最小本身颜色色散系数

在考虑多段传输系统内单个通路的性能时，端到端剩余的颜色色散（包括补偿）必须保持在严格的限值内，以便获得可接受的系统运用。

然而，对于在长距离上小通路间隔（例如100 GHz）的DWDM系统可接受的运用，为了避免诸如四波混合（FWM）和交叉相位调制（XPM）等非线性效应，还要求传输光纤的本身色散系数具有最小值。

为避免这些效应引起的值得注意的代价需要的本身颜色色散系数之值与传输系统设计的许多因素有关，例如，通路间隔、功率电平、链路长度等，因而不属于本建议书的范围。

这些非线性效应的更详细内容在ITU-T G.663建议书和ITU-T 增补G.39中给出，在I.3节讨论缓解它们的一些方法。

7.6 最大颜色色散偏离

最大颜色色散偏离的要求有待进一步研究。

7.7 最大微分群延迟

最大微分群延迟（DGD）适用于发送器（在图5-1中用连到MUX的"3R"表示）和相应的接收器（在图5-1中用连到DEMUX的"3R"表示）之间整个链路。

可以以下的公式按规定的超过概率计算链路（包含多个部件及光纤段）的最大DGD。

$$DGD \max_{link} = \left[DGD \max_F^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}$$

其中：

- $DGD_{max_{link}}$ 是最大链路DGD (ps)
- DGD_{max_F} 是最大级联光缆DGD (ps)
- S 是麦克斯韦尔调节因子 (见表7-5)
- PMD_{Ci} 是第*i*个部件的PMD值 (ps)

这个公式假定瞬时DGD的统计特性用麦克斯韦尔分布近似，瞬时DGD超过 $DGD_{max_{link}}$ 的概率由表7-5查出的麦克斯韦尔调节因子之值控制。

表 7-5/G.696.1 – S值和概率

最大对平均的比值 (S)	超过最大的概率	最大对平均的比值 (S)	超过最大的概率
3	4.2×10^{-5}	4	7.4×10^{-9}
3.2	9.2×10^{-6}	4.2	9.6×10^{-10}
3.4	1.8×10^{-6}	4.4	1.1×10^{-10}
3.6	3.2×10^{-7}	4.6	1.2×10^{-11}
3.8	5.1×10^{-8}		

在ITU-T G.650.2和G.691建议书能够找到更详细的内容。 DGD_{max_F} 的值（由光纤部分产生的最大DGD）能够测量得出，或者用替代的方法，使用相关光纤建议书的PMD_Q系数按给定的光纤长度能够计算出上限值。

表7-6给出NRZ系统的整个链路的DGD限值，表7-7给出RZ系统的限值。

表 7-6/G.696.1 – NRZ的最大链路微分群延迟

客户等级	单位	值
1.25G	ps	240
2.5G	ps	120
10G	ps	30
40G	ps	7.5

表 7-7/G.696.1 – RZ的最大链路微分群延迟

客户等级	单位	值
1.25G	ps	ffs
2.5G	ps	ffs
10G	ps	ffs
40G	ps	ffs

7.8 在MPI-S_M 或S_M的最小光回损

沿光纤通道折射率不连续就引起反射。如不加控制，通过它们对光源或放大器工作的干扰效应或通过多重反射在接收器引起干涉噪声，它们能使系统性能劣化。规范下列参数来控制从光通道来的反射：

- 在光源参考点（例如，MPI-S_M，S_M）光缆设施，包括任何连接器的最小光回损；和
- 光源参考点（例如，MPI-S_M，S_M）和接收参考点（例如，MPI-R_M，R_M）之间最大离散反射。

反射表示从任何单个离散反射点来的反射，而光回损是入射光功率与来自整个光纤的总返回功率包括离散的反射和例如瑞利散射那样的分布背向散射等在内的总返回功率之比。

在附录I/G.957说明反射的测量方法。对测量反射和回损来说，假定点MPI-S和MPI-R与每个连接器插头的端面重合。要认识到，这个方法没有包括工作系统内各个连接器实际的反射性能。假定这些反射之值是所用特定类型连接器的标称反射值。

在MPI-S_M 或S_M光缆设施的最小光回损限制为-24 dB。

7.9 在MPI-S_M 和MPI-R_M之间最大离散反射

光反射被定义为在一个点存在的反射光功率与射入那个点的光功率之比。在ITU-T G.957建议书广泛地讨论了对反射的控制。在光通道（例如配线架或WDM部件）中可以包含的连接器或其他离散反射点的最大数目，必须是要达到规定的光回损所能容许的那么多。如果采用符合最大离散反射的连接器做不到这一点，就必须使用反射性能更好的连接器。反之，必须减小连接器数目。为了避免多重反射引入不可接受的损伤，也可能需要限制连接器数目或使用反射性能良好的连接器。

MPI-S_M 和MPI-R_M之间最大离散反射限制为-27 dB。

8 光的安全性考虑

虽然本建议书涉及光纤基础设施又没有规范工作在它上面的光传输系统的特性，但这样的系统可能会在相对高的光功率电平上运行。关于光的安全性方面的资料能在ITU-T G.664建议书、IEC 60825-1、IEC 60825-2和IEC/TR 61292-4中查到。

附录 I

DWDM系统的理论极限和设计考虑

本附录给出域内DWDM光传输系统能获得的链路距离受到的一些物理和技术限制。

在I.1节，讨论ASE噪声和PMD噪声产生的基本限制。随后，在I.2节讨论限制实际系统距离的其他效应，在I.3节说明减缓这些效应的技术。最后，在I.4节给出用目前可以使用的技术获得的典型性能示例。

I.1 能使用的技术及其限制

本节指明对DWDM应用的技术可行性的某些基本制约。

假定链路的光衰减用光放大器补偿，颜色色散用颜色色散补偿部件补偿。

ASE噪声和PMD是限制DWDM应用的容量和传输距离的最重要损伤。

在I.1节的讨论适用于NRZ线路码，因为这是在DWDM应用中通用的方式。其他线路编码可能有不同的结果，或许在某些情况中更合适（在I.3节讨论替代NRZ的一些方式）。

I.1.1 ASE噪声

ASE噪声的影响用OSNR描述其本质上的特征。如ITU-T 增补G.39所述，具有提升放大器、 $x-1$ 个线路放大器和前置放大器的多路 x 段参考系统的OSNR由下式给出：

$$\text{OSNR} = P_{\text{out}} - L - \text{NF}_{\text{eff}} - 10 \cdot \log \left(x + \frac{10^{\frac{G_{\text{BA}}}{10}}}{10^{\frac{L}{10}}} \right) - 10 \cdot \log [h \cdot \nu \cdot \nu_r] \quad (\text{I-1})$$

P_{out} 是提升放大器和线路放大器的（每路）输出功率，以dBm为单位， L 是以dB为单位的段损耗（假定它等于线路放大器的增益 G_{LA} ）， G_{BA} 是以dB为单位的光提升放大器的增益， NF_{eff} 是光放大器的噪声指数，以dB为单位， h 是普朗克常数（按照 P_{out} 的单位是dBm，以 $\text{mJ} \cdot \text{s}$ 为单位）， ν 是以Hz为单位的光频率， ν_r 是以Hz为单位的参考带宽， $x-1$ 是线路放大器总数。

公式I-1把散射噪声和信号自发的差拍噪声当作最主要的噪声贡献。在某些情况下考虑其他的噪声贡献。

这个公式指明ASE噪声由全部 $x + 1$ 个放大器累积而成。

对于这个参考系统，做出如下主要假定：

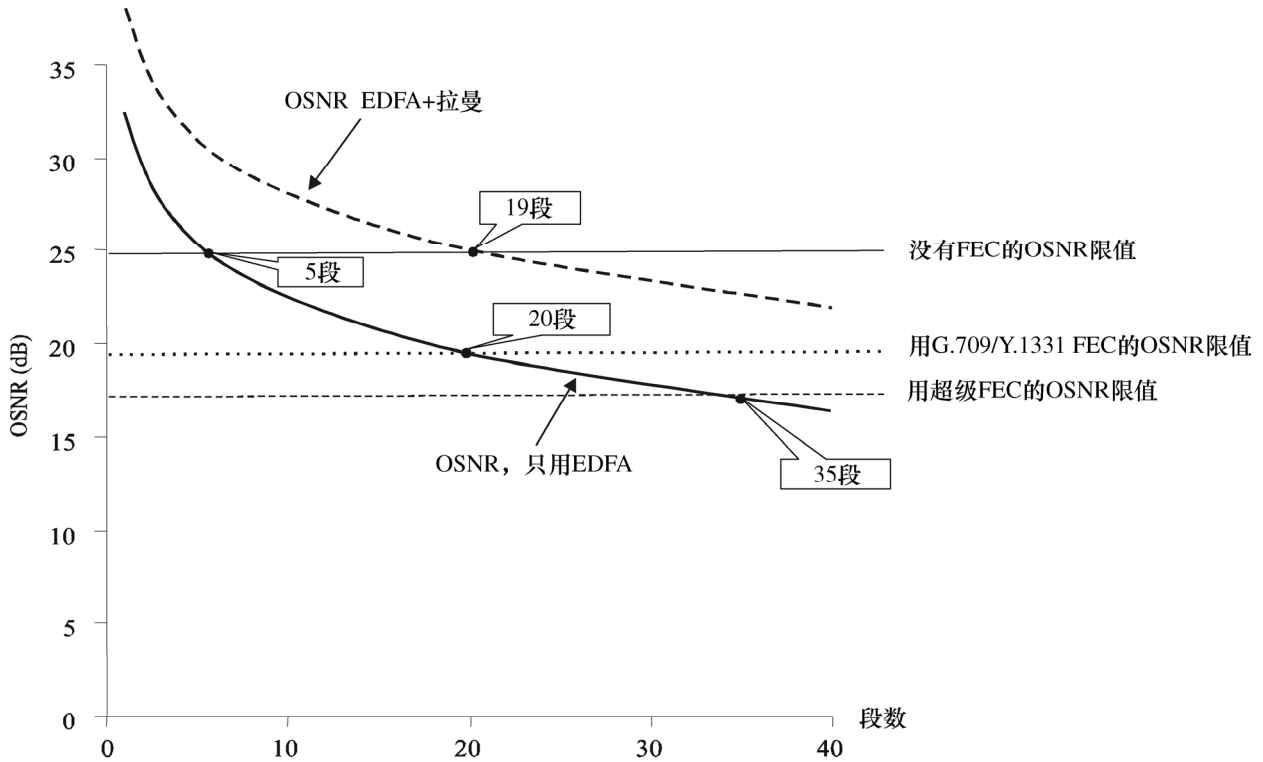
- 链路内所有光放大器，包括提升放大器和前置放大器具有相同的噪声指数。
- 所有段的（每路）损耗相等。
- 提升放大器和线路放大器的（每路）输出功率相同。

例如，假设光通路输出功率 $P_{out} = 3 \text{ dBm}$ ，噪声指数 $NF_{eff} = 6.5 \text{ dB}$ ，参考带宽 $\nu_r = 0.1 \text{ nm}$ 和段损耗 $L = 22 \text{ dB}$ ，得出图I.1中示出的实线曲线。

对于10 Gbit/s数据率，并假定对不同FEC时BER为 10^{-12} 的OSNR限值为25 dB，得出理论极限距离是5段。

如果假定采用净编码增益（NCG）为5.6 dB的G.709/Y.1331 FEC极限OSNR变成19.4 dB，就达到20段。

使用更强有力的FEC，例如附录I/G.975.1中的一种方案，净编码增益（NCG）约为8 dB，极限OSNR变成17 dB，就达到35段。



G.696.1_F1.1

图 I.1/G.696.1 – 参考系统的OSNR限值，OSNR作为段数的函数，有或没有拉曼放大

分布式拉曼放大（DRA）是今后扩展传输距离要选用的手段。DRA按背向泵激组态预期的OSNR改善因子可以用有效噪声指数（ NF_{eff} ）算出，公式I-2能表示 NF_{eff} [1]。

$$NF_{eff} = 10 \cdot \log \left(\left(NF'_{LA} + \frac{P_{ASE,Raman}}{h \cdot \nu \cdot \nu_r} \right) \cdot \frac{1}{G'_{Raman}} \right) \quad (I-2)$$

式中， NF'_{LA} 是分离的线路放大器的线性噪声指数， G'_{Raman} 是DRA的线性增益， $P_{ASE,Raman}$ 是DRA产生的ASE功率， ν_r 是参考带宽。认为 $NF_{LA} = 10 \cdot \log (NF'_{LA})$ ， NF_{LA} 是分离的线路放大器的噪声指数（dB）。

$P_{ASE,Raman}$ 和 $G_{Raman} = 10 \log (G'_{Raman})$ 能用分析估算 [2]。

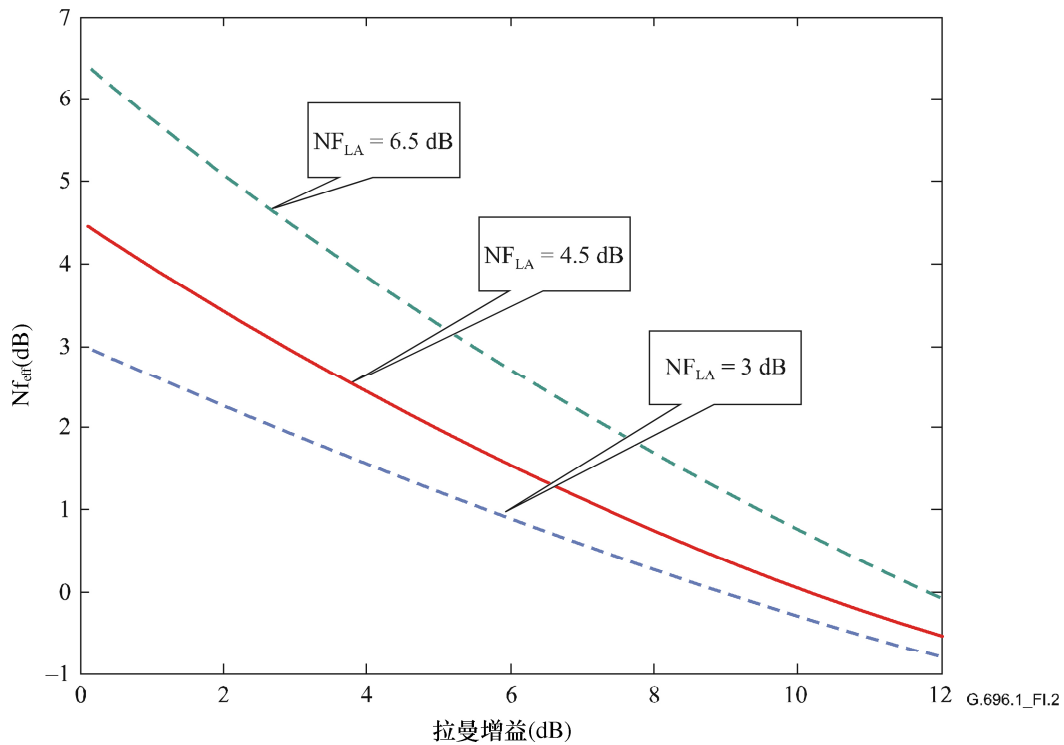


图 I.2/G.696.1 – Nf_{eff} 与拉曼增益的函数关系

图I.2示出 Nf_{eff} 与拉曼增益 G_{Raman} 的函数关系。这里对参数假设如下：光纤长度80 km，衰减系数对信号是0.275 dB/km而对泵激波长是0.3 dB/km，光纤的有效面积为 $80 \mu m^2$ ，拉曼增益系数 $3.1E-14$ 。EDFA的噪声指数分别是3 dB、4.5 dB和6.5 dB。将从公式I-2得出的 Nf_{eff} 代入OSNR公式I-1并利用 $L = G_{Raman} + G_{LA}$ （增益 G_{LA} 是线路放大器以dB为单位的增益），可以估算使用拉曼-EDFA组合的放大器获得的最大传输距离。

假定拉曼增益约为9.3 dB而EDFA噪声指数是 $Nf_{LA} = 6.5$ dB，我们得出有效噪声指数是 $Nf_{eff} = 1$ dB，在图I.1中示出的点划线。

现在，没有FEC的理论极限距离变成19段，增设G.709/Y.1331 FEC能够得到超过40段的系统。

I.1.2 PMD

总长度为L和各个光缆段的PMD系数是 PMD_Q 的光纤链路的总PMD就是 $PMD = \sqrt{L} \cdot PMD_Q$ 。对于10 Gbit/s NRZ接口，总的PMD不应超过10 ps（对于光纤引入的最大DGD = 30 ps，相当于“五个九”的中断概率）。如果PME系数 PMD_Q 之值不大于 $0.5 ps/km^{1/2}$ ，这就得出总链路长度为400 km；而最大PMD系数 $PMD_Q = 0.2 ps/km^{1/2}$ 时，总链路长度变成2500 km，见图I.3。

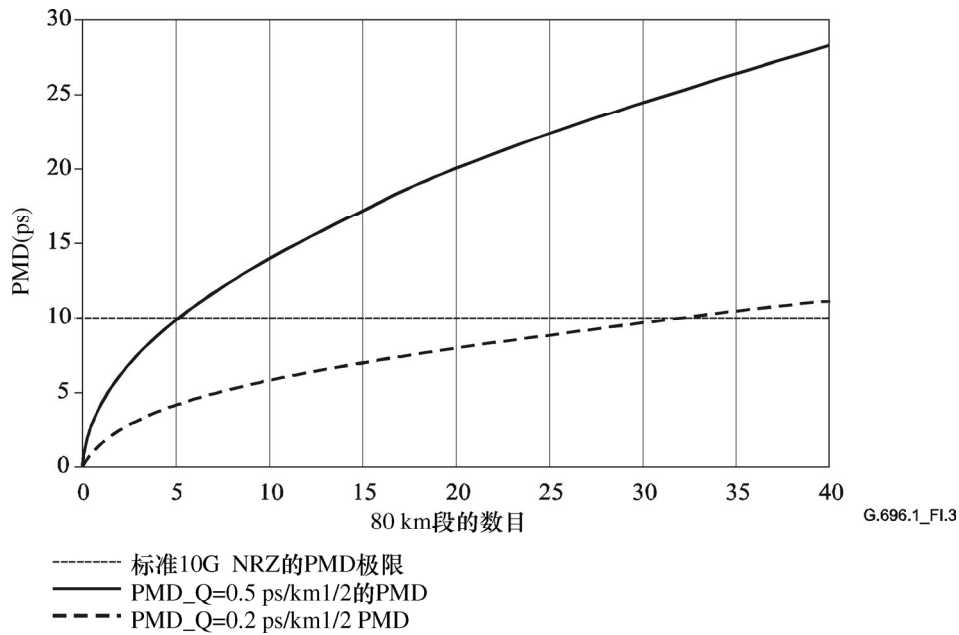


图 I.3/G.696.1 – PMD与不同PMD系数时距离之关系和对10 Gbit/s NRZ系统可用性为99.999%时PMD极限

图I.3给出根据光纤的最大PMD_Q、对NRZ线路码、基于其一阶DGD容差的情况下允许最大距离的指导原则。该图没有考虑来自设备的PMD贡献。

在实际光纤链路上的实际系统应当考虑用光纤链路和组成链路中所有节点的设备的组合贡献得出PMD极限。

在某些情况，还要考虑高阶PMD。

I.2 限制传输距离的其他效应

在前面章节中计算的极限链路距离是在理想环境获得的距离。但是，在实际系统中存在几种会使最大链路长度缩小的效应。

I.2.1 来自EDFA级联的累积增益波动和激励拉曼效应引起的摆动

在实际链路上的实际系统需要考虑累积的增益波动和激励拉曼效应引起的沿着通路的功率发散。

类似增益平坦滤波和动态增益/功率均衡等技术可以用来降低这些效应的影响，但是仍然还是有一些影响，所以可获得的距离会降到图I.1所示距离之下。

I.2.2 不均匀段长

本建议书中应用代码考虑的是相等的段长。对于本附录的讨论，采用每段22 dB的固定衰减。实际系统内，通常段长是不相等，实际上与真实的网络拓扑受到的限制有关。

用一般的方法很难将这种“不理想”考虑进去，因此，对于同一系统，较长的段长意味着OSNR“负债”而较短的段转化为“贷出”。

较长段欠下OSNR“负债”能够由提高前述段自身的放大器的输出功率得到实际的或完全的补偿，只要提高功率不会引起若无额外的代价就不能补偿的非线性效应。

因而，一般地说，较长段的链路多半会迫使系统支持较少的段数，而较短段的链路能允许系统支持更多的段数。这个事情属于设备供应商的特定系统设计，为了对这些类型的应用给出一个更容易理解的观点，在这里只做出简单的说明而不做出任何更详细的解释。

I.2.3 光的非线性

自相位调制（SPM）和/或交叉相位调制（XPM）等非线性效应在各个段上累积，在段数变化时它就会产生重大影响。因而，在实际链路中非线性效应不能忽略。

较高的通路功率对OSNR有利，但对BER未必就好。这是因为光纤有非线性效应。

考虑NRZ、通路平均功率为3 dBm、在G.652光纤上（图I.1假定的同一功率），累积的非线性（SPM）相位 $\Phi_{NL} = \gamma P_{ch} L_{eff} N_{span}$ ，在10段之后接近1弧度，传输进入所谓“强非线性失真”区，在这个区域链路距离受到非线性限制。因而，总的链路长度比图I.1只根据OSNR极限预期的小许多。

光的非线性更详尽的说明在ITU-T G.663建议书和ITU-T 增补G.39，减轻这些效应的一些方法在I.3节讨论。

I.2.4 残留色散和色散容限

图I.1中曲线假设WDM系统内每个通路都有完美的色散补偿。要使用其色散对波长的斜率精确地与所用光纤的特性相反的色散补偿模块（DCM），通常这是做不到的，即使如此在段数增多时也要考虑到高阶颜色色散。

另外，斜率失配使某些WDM通路产生残留的失真，如不减轻它，非线性失真会使频谱展宽从而减小了光纤传输后的色散容限。

例如，对于周期补偿的光纤链路，非线性引起负的啁啾使色散补偿容限缩小并使最佳色散补偿点移向正的净色散。在图I.4说明这种效应。

这个例子的依据是对一个G.652光纤的10 × 80 km上使用NRZ 10G信号、每路平均输出功率为3 dBm的八路DWDM系统的模拟。该模拟假定每80 km段的颜色色散在每个线路放大器得到精确的补偿。

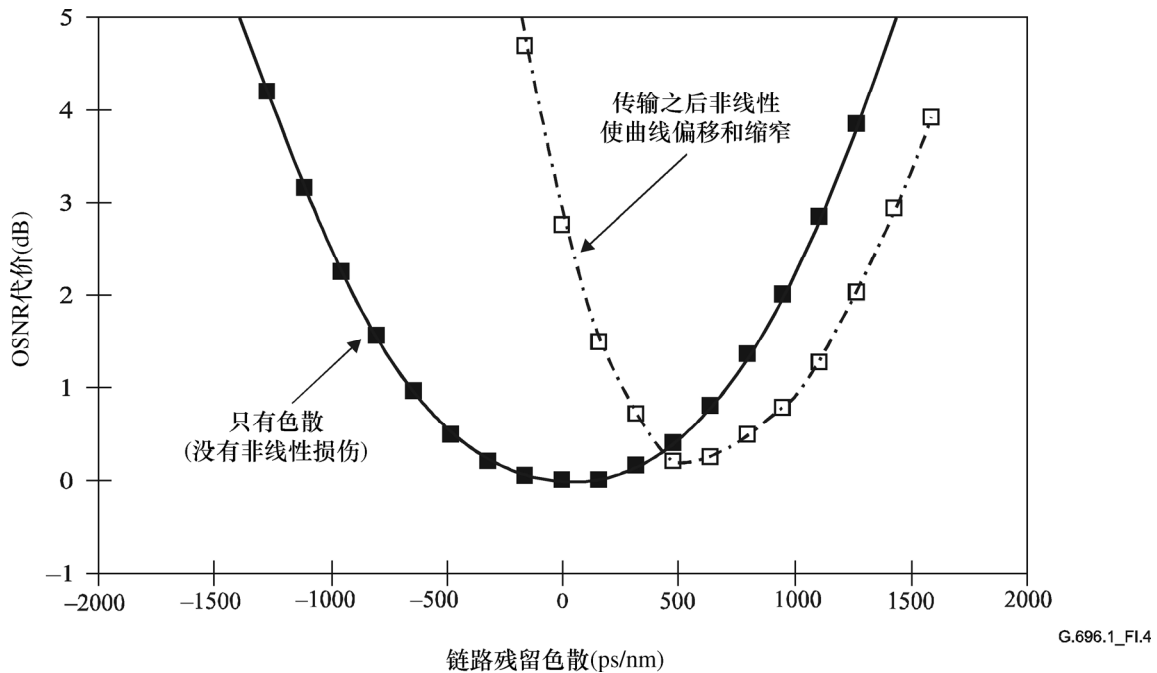


图 1.4/G.696.1 – 非线性对传输后色散容限的影响示例

1.2.5 累积的PDL效应

诸如WDM滤波器、VOA或OA等光部件呈现有限的偏振相关损耗（PDL），其范围是每个部件0.1 到 0.3 dB或者更大。由于信号偏振随时间变化，PDL使光信号发生强度调制。在偏振相关增益（PDG）的影响下OA把引入的这种功率起伏转换成OSNR起伏。

在扩展的长途系统有许多光网络单元级联，累积的PDL会产生可观的功率起伏，使系统的性能及稳定性劣化。但是，功率起伏和OSNR变化之间的关系未必是一一对一的。可能功率起伏太快，利用动态增益均衡不能完全补偿。

1.3 用来减轻损伤的技术

有几种实际的技术能改善IaDI链路性能，例如选用：

- i) 动态增益均衡；
- ii) 线路编码；
- iii) 光通路的数目及它们的间隔；
- iv) 光纤类型；
- v) 在一个段内混用不同类型的光纤

1.3.1 动态增益均衡

为了补偿长的放大链引起的增益摆动，使用综合光谱分析器（OSA）或光功率监测器（OPM）和可调增益平坦滤波器能够保证跨过DWDM集合信号的全部通路获得良好的均衡。

I.3.2 调制格式

NRZ以外的调制格式在某些情况能获得一些优势。

如ITU-T 增补G.39所述，归零（RZ）线路编码系统比NRZ系统能更有效地容忍一阶PMD。同样地改进的RZ编码格式，例如相位调制RZ，能够在提高非线性容限方面带来附加的优势。这些特性促进了在很长的链路距离时RZ线路编码的用途，在那些场合PMD和非线性效应实际上是很显著的。

另一方面，RZ编码（由于要使用较宽的带宽）比NRZ光谱有效性更小的潜在缺点（ITU-T增补G.39），通常比NRZ对残留颜色色散更敏感。基于这个理由，采用RZ调制格式的系统要求更准确的特性和对链路色散的补偿。

除NRZ和RZ之外的线路码也可以适用于DWDM系统，它们各有优缺点。实际上，对长度很长的链路和超大容量DWDM信号，实际线路码的选择取决于各个最佳系统设计。

I.3.3 光通路数及它们的间隔

作为一般的倾向，能得到可接受性能的DWDM通路的最大数目由于光的非线性效应增加倾向于降低链路长度和/或减小光通路间隔。

I.3.4 光纤类型

一种光纤类型与另一种相比在某种条件下具有优点或缺点。例如在C波段，G.652比G.655或G.653光纤有更大的颜色色散，因而，它引入较小的非线性效应。但是，拉曼增益与光纤类型紧密相关，由于G.652光纤有大的模场直径，与其他光纤相比对于给定的泵功率显出更小的拉曼增益。

I.3.5 在一个段内混用不同类型的光纤

能用来减轻光纤非线性效应的一种技术是在单个段内慎重地混用不同特性的光纤。例如，在一段内交替地包含正色散和负色散的光纤，使得该段具有高的本身色散值（降低XPM和四波混合（FWM）效应所希望的）却又有低的净色散（降低色散补偿的要求）。

在不同段内光纤类型不同的链路，馈入功率在每段会不一样，取决于每段头20 km的光纤类型，以便最小化非线性失真。

I.4 实例

按先前的讨论，对给定的通路间隔、工作波长区、比特率以及与许多系统设计选择，如与是否采用FEC方式或使用动态增益均衡或使用拉曼放大相关的段损耗等等条件下实际上能获得的段数已有明确答案。

然而，作为一个可用技术的实例，目前具有下列属性：

- 最大通路间隔： 100 GHz；
- 工作波长区： C波段（1530 到 1565 nm）；
- 客户等级： 10G；
- 段损耗： 22 dB；

- G.652光纤;
 - G.709/Y.1331 FEC,
- 的光传输系统，能经济有效地达到最大约15段的距离。

参考资料

- [1] ISLAM (M.N.) (Ed.) : Raman Amplifiers for Telecommunications 2 Sub-Systems and Systems, *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 90/2, pp. 432, 2004 (ISBN:0-387-40656-5) .
- [2] AOKI (Y.) *et al.*: Properties of fibre Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 1225-1239, 1988.

ITU-T 系列建议书

A系列	ITU-T工作的组织
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	传输系统和媒质、数字系统和网络
H系列	视听和多媒体系统
I系列	综合业务数字网
J系列	有线网和电视、声音节目及其他多媒体信号的传输
K系列	干扰的防护
L系列	线缆的构成、安装和保护及外部设备的其他组件
M系列	电信管理，包括TMN和网络维护
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、电话装置、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及安全
Y系列	全球信息基础设施、互联网的协议问题和下一代网络
Z系列	用于电信系统的语言和一般软件问题