

新一代信息通信技术书系·光网络专辑

WDM 超长距离 光传输技术

顾畹仪 编著

1
WDM CHAOCHANG JULI

GUANGCHUANSHU

JISHU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

新一代信息通信技术书系·光网络专辑

TN929.1
G518 ·

WDM 超长距离光传输技术

顾晓仪 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

大容量 WDM 超长传输系统具有结构简单、功能强大、成本低等优点,是当前光通信领域研究和应用的热点,已引起运营商的关注。本书在作者承担并已完成的国家 863 关于 WDM 超长传输项目的基础上,结合作者的认识和积累,拟总结 WDM 超长传输的系统结构和关键技术而成。主要内容包括 WDM 超长距离光传输系统结构、超长传输系统中的光放大器技术、群速度色散和偏振模色散对系统的影响及其补偿技术、光纤的非线性光学效应对超长传输的影响以及减弱其影响的一些方法,各种新型调制格式在系统中的应用以及接收、均衡和纠错编码等技术。

图书在版编目(CIP)数据

WDM 超长距离光传输技术/顾晓仪编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005

ISBN 7-5635-1170-9

I. W... II. 顾... III. 长距离—光通信 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 113044 号

书 名: WDM 超长距离光传输技术

编 著: 顾晓仪

责任编辑: 方瑜

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

电话传真: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 22.5

字 数: 490 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1170-9/TN·409

定 价: 38.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·



21 世纪是经济全球化、全球信息化的崭新世纪。

信息化要靠信息系统的支持,通信则是信息系统的核心和桥梁。离开了通信来谈信息化是不可能的。今天,人们越来越倾向于以更为广义的信息通信的丰富内涵来替代相对狭义的通信的概念。

信息通信发展的目标是要实现无论何人在何时何地都能与另一用户(包括网站)进行用各种媒体表达的高质量的信息传输,实现各种信息服务。信息通信是一个巨系统,凡是人类活动之所及都能找到它的踪迹。信息通信同时又是一个整体,任何一种通信方式和通信技术都不可能孤立地存在、单独地发挥作用,各种通信方式和技术只有互相协同、配合和支撑才能构成一个完整的通信过程。当代信息通信系统还有一个特点是与计算机相互交融、相伴相随、密不可分。自 20 世纪以来,计算机与集成电子技术得到了飞速发展,与此相应,信息通信技术也呈现日新月异的发展态势。摩尔定律在信息通信领域同样显示出它的规律。

信息通信既是一个巨大的概念,又是一个巨大的系统,同时还是发展迅速、变幻莫测的领域。我们不敢奢望用一两本书的有限容量来展示它的全貌和魅力。显然,在世纪之初全面地回顾、盘点信息通信技术在近年的发展 and 现状,展望和评述它的趋势和变化,无疑是有意义的和必要的。基于此,北京邮电大学出版社聘请业界的著名专家、学者组成阵容强大的编委会,全面、深入、系统地分析并探讨当今信息通信最新技术的发展和未来发展的走向,条分缕析,精挑细选,决定策划出版一套反映信息通信技术最新发展及其热点的图书,并向信息通信领域的知名专家组稿。在经过周密而细致地论证、研讨,并得到方方面面的热情支持和鼎力相助之后,初步形成了现在由 4~5 个专辑组成的“新一代信息通信技术书系”。

由于覆盖面宽、内容庞大,该书系按技术基础和应用相近的原则划分为不

同的专辑,基本涵盖了当今信息通信技术发展的大部分前沿领域。每一专辑只介绍信息通信领域中的一种技术门类,包括原理综述,技术进展的评介和作者自己的工作成果。由于该书系的作者都是信息通信领域的知名学者和领军人物,他们撰写的内容无疑具有权威性和前瞻性,相信会得到广大读者的欢迎,并产生积极意义和影响。

在写作方式和篇幅上,书系不追求系统、严格和完善的理论分析,不追求大而无当的鸿篇巨制,而坚持立足于对相关技术的原理阐述、应用开发、趋势评介和引导等原则,尽可能做到深入浅出、规模适当,因此特别适合大多数信息通信和相关领域工程师及高等院校的教师学生以及从业人员阅读和参考。

本书系从一开始就得到许多领导和专家学者的热情支持和帮助,在此一并表示深切的感谢!

信息通信技术的发展变化极快,本书系虽尽可能顾及方方面面,但仍有一些内容没能被纳入,我们会不断地充实,在今后的一段时间内努力完善这一书系。另外,书系中的每一本书也会受种种条件的限制,在内容和行文中可能存在欠缺,对技术发展的评价也会因人而异,我们也并不追求一致。本书系虽经编委会、所有作者和编辑出版者的努力,但疏漏和错误在所难免,我们恳请读者的批评和建议,希望能把这一有意义的工作做得更好!

乐克新

于 2005 年新春

序

在过去的十几年中,通信科技发展迅速,成为引领信息潮流的重要力量,强劲地推动着人类社会向信息化方向的迈进并改变着人们的工作和生活方式。在艳丽的现代通信技术的芳苑中,光网络奇花绽放,以接近无限的带宽潜力、卓越的传送性能和优越的联网能力而倍受人们的关注,成为支撑国家乃至国际信息基础设施的重要基石。

在20世纪90年代中期,掺铒光纤放大器(EDFA)和密集波分复用(DWDM)技术先后成熟并商用,这两项技术不仅使光纤的传输容量迅速攀升,而且也使大容量、数千公里无电中继再生的超长距离传输成为可能。目前,单纤传输容量在实际网络应用中已经达到太比特每秒数量级,无电中继的传输距离已超过7000km,满足了由于Internet业务爆炸式的激增而带来的对带宽和容量的巨大需求。与此同时,光域分插复用(OADM)、交叉连接(OXC)和交换技术的研究与应用使得光波长具备了联网能力,光通信的应用由传送扩展到交换领域,在提供巨大的传送容量的同时,极大地增加了网络节点的吞吐能力。

在目前容量和带宽问题基本解决的情况下,具有灵活带宽按需供应和满足多业务需求的动态光网络成为研究和应用的热点,主要表现在两个方面:其一是增加网络的智能、提升网络的功能、更灵活高效地支持各种新业务(尤其是数据业务),即智能光网络成为新的研究与应用热点;另一个热点是光网络在城域网和接入网中的广泛应用。

智能光网络通过控制平面的引入,允许电子交换设备根据网络中业务分布模式动态变化的需求,通过信令系统和路由机制自主地去建立或者拆除光通道,不需要人工干预。这种网络集中了IP的效率、DWDM的容量、SDH的健壮性,获得前所未有的灵活性与可升级能力,成为下一代光网络演变的主流方向。

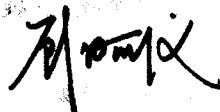
提供丰富多彩的业务是充分发挥网络带宽和资源效益的前提。城域光网络和接入光网络面向用户和业务,提供业务的接入、梳理、汇聚和传输功能,成为近几年通信网建设的重点。

“新一代信息通信技术书系·光网络专辑”目前包括六本书,论述了当前光纤骨干网、城域网和接入网中的热点和前沿问题。在内容上,该专辑涉及引领光网络潮流的智能光网络和光突发交换网,支持超长距离的 WDM 光传输的先进技术,还有光网络新业务与支撑技术,以及新一代城域光网络和接入光网络的关键技术等。

专辑的作者都是中青年学俊,长期在光网络领域进行教学与研究,先后承担并圆满完成过多项国家级科研项目和国际合作课题,参与过国家光通信示范网的研究与建设,取得了丰硕的研究成果和丰富的研究经验,并长期奋斗在教学第一线,为培养优秀的通信人才贡献了自己的力量。本次他们将多年的研究心血与教学经验凝聚在本专辑中,作为送给北京邮电大学 50 周年生日的礼物,奉献于读者面前。

北京邮电大学出版社为专辑的出版倾注了极大的热情,做了大量的工作,我们谨此致以诚挚的谢意。

是为序。



2005 年 3 月于北京邮电大学

前 言

经历了一段低迷之后,通信行业正逐渐复苏,进入了理性回归期,光通信也迎来了新的发展机遇。面对 IP 流量的爆炸式增长,IPTV、HDTV 和三维播放等新业务的快速发展,人们对带宽的需求日益剧增,这促使了 WDM 技术走向成熟,可以根据市场的需求来提供合适的服务和所需的容量。在新的发展时期中,实用性理念成为主导,性能价格比成为人们决策和占有市场的重要因素,人们不再单纯地追求速率和容量,而是更注重提升光网络的功能,挖掘其潜力,降低网络的建设成本和运营维护成本。

在这个新的发展时期中,WDM 超长距离传输系统是备受关注的热点技术之一。该系统采用波分复用和低噪声光放大技术实现长途干线的超大容量传输,利用光分插复用设备解决沿途的上下路问题,通过采用众多新技术克服超长传输中的诸如噪声和色散的积累、非线性光学效应的影响等多种传输损伤,实现大容量信号的低成本、超长距离传输,从而降低运营维护管理成本,简化传输设备,并通过各种先进的光、电信号处理技术实现对现有光传输设施的扩容和升级,成为解决带宽需求和运营、维护、成本矛盾的一种有效且成熟的途径,也为未来光网络的发展奠定了良好的基础。

WDM 超长距离传输中遇到了许多前所未有的障碍,级联光放大的过程中不断积累的自发辐射噪声限制了总的传输距离,长距离传输中的色度色散和偏振模色散进一步限制了信号速率的提高,非线性光学效应的加剧阻碍了复用信道间的增加和复用间隔的减小,等等。然而,机遇与挑战并存,为了解决这些传输损伤,各种新的技术方法也不断涌现。适合于 WDM 传输的新型光纤、色散补偿/色散管理和宽带低噪声光放大是 WDM 超长传输系统的早期的三大关键技术,为大容量长距离传输奠定了基础。新型信号调制格式、自适

应补偿、电信号均衡和纠错编码是近年来新涌现的重要技术,不仅使系统容量距离和大幅度增加,而且更适合于对已经铺设好的系统进行升级和改造。在这些新技术的综合应用之下,系统的容量距离不断攀升,频谱效率不断提高,世界记录被频繁刷新。

本书围绕支撑 WDM 超长传输的关键技术展开论述。在介绍了 WDM 超长传输系统的发展概况后,系统地论述了宽带低噪声光放大、色度色散补偿与管理、偏振模色散及其补偿、非线性光学效应及其抑制、新型调制格式和信号接收处理等问题的物理机理、数学描述和多种技术解决方案,并介绍了国内外大量的理论、实验研究和模拟仿真的结果。这些技术不仅对实现 WDM 超长传输至关重要,而且在 10 Gbit/s 与 40 Gbit/s 高速光传输系统和智能光网络中有广泛的应用,是光通信领域引人注目的热点和前沿课题。尽管某些技术距离实用还有一段时间,但对这些问题的研究必将福荫于整个通信行业。

作者在本书的写作过程中广泛收集了大量的国内外技术资料,参阅了 ITU-T 相关建议,充分总结了作者及其研究室在完成国家自然科学基金和国家 863 计划课题中的研究成果,并运用自主开发的光网络传输仿真软件得到大量的仿真结果,其中凝聚了近年来我们的研究心血和经验。借此机会,作者对国家自然科学基金委员会和国家 863 计划多年的资助表示衷心的感谢。

参与本书编写和资料收集的研究生还有王欣、雷波、郝斌、叶宇、罗超、许静和赵阳等,另外,在 WDM 超长传输的研究中还得到了深圳市中兴通讯股份有限公司新技术研究中心的施社平、高峰、古洲、王国忠等同志的指导和帮助,作者对他们表示衷心的感谢。

本书涉及到多项正在发展中的新技术,由于作者水平有限,难免有疏漏与错误之处,恳请同行和广大读者批评指正。

作者

2005 年 8 月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 WDM 超长距离光传输系统

1.1 概述	1
1.2 当前发展状况	2
1.3 发展历程与关键技术	6
1.3.1 非线性光纤光学效应的影响与新型光纤的问世	6
1.3.2 群速度色散与偏振模色散的积累和补偿技术的应用	8
1.3.3 宽带宽低噪声光放大的需求和分布式光纤拉曼放大器的采用	9
1.3.4 新型调制码型的采用与 WDM 超长距离传输性能进一步的提高	10
1.3.5 信号均衡接收处理	11
1.3.6 前向纠错编码的应用	11
1.3.7 未来的发展道路	13
1.4 WDM 长距离传输系统及其研究和分析方法	15
1.4.1 系统组成	15
1.4.2 系统分类	18
1.4.3 系统研究方法	18
本章参考文献	21

第 2 章 超长距离传输系统中的光放大技术

2.1 光放大技术的概述	28
2.1.1 光放大器的分类	28
2.1.2 光放大器的发展历程	30
2.1.3 超长距离 WDM 传输系统对放大器的要求	31
2.2 EDFA 放大器	38
2.2.1 工作原理	38
2.2.2 放大器模型和基本数学描述	40
2.2.3 性能参数及其影响因素	44
2.2.4 实用放大器考虑	47

2.3 光纤拉曼放大器	51
2.3.1 工作原理	51
2.3.2 特点	54
2.3.3 数学模型	54
2.3.4 FRA 的性能参数及变化规律	57
2.3.5 实用放大器考虑	59
2.3.6 放大器的应用	69
2.3.7 放大器的优化设计	71
2.4 其他放大器	79
2.4.1 半导体光放大器(SOA 或 SLA)	79
2.4.2 参量放大器	85
2.5 光放大器在超长距离传输系统中的应用	92
2.5.1 混合放大	92
2.5.2 宽带放大	93
2.6 总结	96
本章参考文献	96

第3章 超长传输中色度色散的补偿及管理

3.1 色度色散的产生	110
3.1.1 色散的物理机理	110
3.1.2 材料色散的脉冲展宽	111
3.1.3 波导色散的脉冲展宽	112
3.2 色度色散对信号传输的影响	113
3.2.1 群速度色散的影响	114
3.2.2 三阶色散的影响	117
3.3 色度色散的补偿	120
3.3.1 固定色散补偿	120
3.3.2 可调色散补偿	127
3.4 色散斜率补偿	132
3.4.1 基于 DCF 的固定斜率补偿	133
3.4.2 用于固定斜率补偿的 FBGs	133
3.4.3 虚拟成像相位阵列(VIPA)斜率匹配	134
3.4.4 基于 FBG 的可调斜率补偿	134
3.5 色散管理	134
3.5.1 色散管理的基本原理	134
3.5.2 10 Gbit/s WDM 系统的色散管理	137
3.5.3 40 Gbit/s WDM 系统的色散管理	139
本章参考文献	142

第4章 超长传输中 PMD 的影响及其补偿

4.1 PMD 的产生机理	148
4.1.1 光的偏振态的表示方法	148
4.1.2 光的双折射	152
4.1.3 模式耦合	154
4.2 PMD 的基本理论	155
4.2.1 主偏振态(PSP)理论及差分群时延的定义(PSP 带宽)	155
4.2.2 PMD 矢量	157
4.2.3 高阶 PMD	158
4.2.4 PMD 动态方程	158
4.2.5 PMD 级联规则	159
4.3 PMD 的统计特性及仿真	161
4.3.1 一阶和二阶 PMD 的统计规律	161
4.3.2 PMD 的相关性	164
4.3.3 PMD 的数值仿真	165
4.4 PMD 对系统的影响	168
4.4.1 一阶 PMD 功率代价	168
4.4.2 系统出界概率	169
4.4.3 二阶 PMD 的影响	170
4.4.4 DWDM 系统中的 PMD	172
4.5 PMD 的补偿	174
4.5.1 PMD 补偿的意义及分类	174
4.5.2 光域补偿技术	174
4.5.3 电域补偿	179
4.5.4 其他技术	180
本章参考文献	180

第5章 光纤非线性效应对超长传输的影响

5.1 非线性效应产生机理	183
5.1.1 线性光学和非线性光学	183
5.1.2 光纤中各种非线性效应的产生机理	185
5.1.3 光纤中非线性效应的重要性	187
5.2 光纤非线性效应数学模型与仿真	188
5.2.1 从 Maxwell 方程组到非线性脉冲传输方程	188
5.2.2 自相位调制	192

5.2.3	交叉相位调制	196
5.2.4	四波混频	201
5.2.5	受激喇曼散射	203
5.2.6	受激布里渊散射	208
5.3	各种非线性效应对超长距离传输系统的影响	211
5.3.1	SPM 的影响	212
5.3.2	XPM 的影响	214
5.3.3	FWM 的影响	215
5.3.4	受激喇曼散射的影响	217
5.3.5	受激布里渊散射的影响	217
	本章参考文献	218

第 6 章 超长传输系统中的新型调制格式

6.1	新型光调制格式介绍	219
6.1.1	光调制	219
6.1.2	新型光调制格式	220
6.2	新型调制格式的关键器件	221
6.2.1	马赫-曾德尔调制器	221
6.2.2	电吸收调制器	224
6.3	基于强度调制原理的新型调制格式	224
6.3.1	RZ、CSRZ 和 SSB 调制格式	225
6.3.2	双二进制调制格式	232
6.3.3	相位整形二进制传输调制格式	236
6.4	基于相位调制原理的新型调制格式	239
6.4.1	差分移相键控调制格式	239
6.4.2	差分正交相移键控调制格式	245
6.4.3	八级相移键控调制格式	248
6.5	基于偏振调制原理的新型调制格式	249
6.5.1	双二进制偏振位移键控调制格式	250
6.5.2	比特间插偏振调制格式	250
	本章参考文献	251

第 7 章 超长传输系统中的信号接收与处理技术

7.1	概述	260
7.2	IM-DD 系统的光接收机的模型与优化设计	261
7.2.1	接收机的组成结构	261

7.2.2	IM-DD 的 WDM 超长传输系统中光接收机的噪声分析	263
7.2.3	光接收机的误码率计算	269
7.3	均衡技术	274
7.3.1	光传输系统中的损伤因素	275
7.3.2	符号间干扰的产生和均衡原理	275
7.3.3	光传输系统中的均衡接收模型	278
7.3.4	均衡技术及其分类	280
7.3.5	线性均衡	281
7.3.6	判决反馈均衡	287
7.3.7	非线性消除	289
7.3.8	最大似然序列估计	291
7.3.9	均衡技术的应用	296
7.3.10	小结	298
7.4	纠错编码技术	298
7.4.1	背景介绍	298
7.4.2	纠错编码分类简介	300
7.4.3	WDM 传输系统中对纠错编码的要求	303
7.4.4	常用的纠错编码方案	305
	本章参考文献	314
	附录 A 部分超长距离传输系统相关表格	318
	附录 B 窄带带通信号的数学表示	327
	附录 C Volterra 级数与非线性系统	330
	附录 D 原子光谱标记介绍	334
	缩略语	336
	索引表	341

WDM 超长距离光传输系统

WDM 超长距离传输(ULH)已经成为光网络的关键技术之一而备受人们关注,本章将对其概况进行介绍,包括 WDM 超长距离传输的意义、发展历程、关键技术、研究方法等。

1.1 概述

带宽需求对通信特别是骨干通信提出了很高的要求,表现为信息容量大、通信距离长、通信质量高、系统可靠性好,另外网络拥有者和运营者要求网络投资成本小、运营维护成本低、系统寿命长、维护升级方便等,这些要求给骨干传输系统提出了很大的挑战。光纤通信以其巨大的带宽资源和良好的通信质量成为骨干传输的必然选择,而波分复用(WDM)技术在光纤中通过增加并行传输波长的数量来提高系统容量,是目前最为成熟的技术。WDM 技术只需要在发、收端分别增加复用、解复用器,并对链路做一定的改造,就能以较低的成本实现升级扩容。另外,光放大器的出现极大地扩展了无电再生中继距离,减少了电再生中继器的数量,提高了系统的可靠性,降低了成本和维护难度。目前,采用 WDM+光放大器的实验系统可以实现 6.32 Tbit/s (159×40 Gbit/s) 无电中继传输 6 100 km 的距离^[1], 3.73 Tbit/s (373×10 Gbit/s) 传输 11 000 km^[2], 如果采用 3R(再放大、再整形、再定时)再生技术可以实现 160 Gbit/s (4×40 Gbit/s) 传输 30 000 km^[3]。由于系统升级扩容潜力大、技术成熟,所以 WDM 长距离传输必然成为骨干传输的关键技术。

从技术发展的角度来看,WDM 长距离传输系统也是构建未来光网络的基石。因为未来光网络的发展历程必先经过初期的简单的点到点传输系统阶段,然后发展成为具有上下话路能力的链路结构和具有保护功能的环网结构或多环结构,再发展为具有智能的格状(mesh)光网络,到最后成为能综合运用各种光处理技术的光子网络(全光)。各个发展阶段的系统都是以 WDM 长距离传输为其支撑技术。

另外,WDM 长距离传输系统是新技术的实验大平台。因为长距离传输面临着许多极限性的挑战,如光信噪比(OSNR)低,色散、非线性效应影响严重,存在串扰等等,需要综合采用各种先进的技术来克服这些障碍,因此它也成为新技术(如新型光纤的使用、色散管理技术、低噪声放大器、新的编码调制格式、偏振模色散(PMD)补偿、自适应均衡、光

信号再生等等)的试验平台。利用这个试验平台可以对各种新技术进行检验和验证。

最后,随着 WDM 长距离传输技术的成熟,其先进的技术还可以移植到城域网和接入网中,有利于提高这些中低层次传输系统的性能。

综上所述,WDM 长距离传输是当前解决带宽需求和运营、维护、成本矛盾最有效和成熟的技术,而且也是未来光网络的基础。它综合应用了多种先进技术手段来提高系统的容量和传输距离,并检验和吸纳新的技术,其积累的成果将福荫于其他领域的传输系统。

1.2 当前发展状况

长距离 WDM 传输作为光网络中的关键技术之一已经成为当前的研究热点,对此各国正积极地展开有关的研究和实验。我国也把超长距离 DWDM 传输列入国家 863 计划之中。表 1-1 和表 1-2 中给出从 2000 年到 2004 年来 OFC(Optical Fiber Communication Conference)和 ECOC(European Conference on Optical Communication)会议上报道的部分 WDM 长距离传输试验系统的成果,图 1-1 给出了这些系统的传输容量和传输距离。附录 A 表 A-1 中给出了系统的详细配置。截止到目前,超长距离 DWDM 传输已有了巨大的发展,在传输容量、传输距离和频谱利用率等方面取得了重要突破。

表 1-1 2000~2004 年在 OFC 和 ECOC 上报道的关于超长距离陆地传输实验

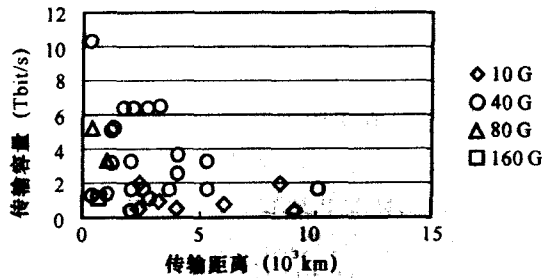
容量 (Gbit/s)	距离 (km)	容量距离积 (Pbit/s·km)	信息速率 (Gbit/s)	信息频谱效率 (Bit/s/Hz)	光纤段距离 (km)	备注	参考文献
10 G 系统							
400	2 400	0.96	10	0.2	200		[16]
320	9 000	2.88	10	0.27	150		[17]
640	5 985	3.83	10	0.3	95		[18]
1 850	8 400	15.54	10	0.4	100		[19]
40 G 系统							
6 300	1 700	10.71	40	0.8	100	SMF 光纤 PSBT 码型	[20]
6 360	2 100	13.36	40	0.8	100		[21]
3 560	4 000	14.24	40	0.4	100	无缝宽带完 全拉曼放大	[22]
6 300	2 700	17.01	40	0.8	100	带宽限制 PSBT	[23]
6 400	3 200	20.48	40	0.8	100		[24]
80 G 系统							
3 200	1 000	3.20	80	0.8	100		[25]
5 120	320	1.64	80	1.6	80	RZ-DQPSKS SMF 传输	[11]
160 G 系统							
1 020	600	0.61	160	0.53	100		[26]

注:表中黑体字表示其突出的性能指标。

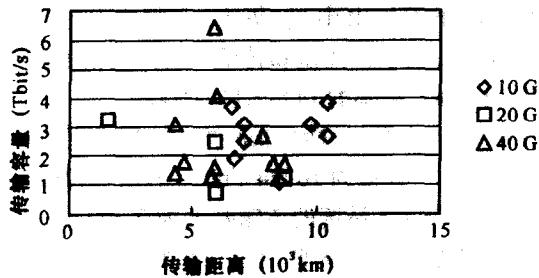
表 1-2 2000~2004 年在 OFC 和 ECOC 上报道的关于超长距离海洋传输实验

容量 (Gbit/s)	距离 (km)	容量距离积 (Pbit/s·km)	信息速率 (Gbit/s)	信息频谱效率 (Bit/s/Hz)	光纤段距离 (km)	备注	参考文献
10 G 系统							
3 000	7 378	22.13	10	0.4	52.7	NRZ 码	[27]
3 650	6 851	25.00	10	0.45	52.7	NRZ 码, EDFA C+L	[28]
2 560	11 025	28.22	10	0.26	40		[29]
3 010	10 270	30.91	10	0.65	51.8	EDFA C	[30]
3 730	11 025	41.12	10	0.4	40		[31]
20 G 系统							
1 120	9 156	10.25	20	0.4	40		[32]
2 400	6 160	14.78	20	0.48	49		[33]
40 G 系统							
1 600	8 694	13.91	40	0.57	43.3		[34]
1 600	9 180	14.69	40	0.4	65		[35]
1 600	10 000	16.00	40	0.4	100	双向拉曼放大器	[8]
3 200	5 200	16.64	40	0.4	100	A/B/A 对称色散管理	[36]
2 560	8 211	21.02	40	0.8	43		[37]
4 000	6 240	24.96	40	0.64	65		[38]
6 360	6 120	38.92	40	0.8	65	没有脉冲成形的 DPSK	[39]

注:表中黑体字表示其突出的性能指标。



(a) 陆地传输系统



(b) 海洋传输系统

图 1-1 2000~2004 年在 OFC 和 ECOC 上报道的部分超长距离传输系统性能比较图