

“波分复用+光纤放大器”——下一代光纤传输系统

The Next Generation Lightwave Transmission System: WDM+EDFA Optical Fiber Communication System

徐安士 吴德明 谢麟振

(北京大学无线电电子学系,教授 北京 100871)

高速度、大容量光纤通信网络是国家信息基础设施的主要组成部分之一。自18年前光纤通信实用化以来,在世界范围内得到了很大的发展,但光纤通信系统的潜在容量极大,远没有得到充分利用。如何在光纤通信系统中提高通信系统和通信网络的传输容量以满足社会大量的信息需求,是光纤通信技术发展的重要问题之一。

提高光纤通信传输容量的途径主要有如下两种:

1. 提高每芯光纤中单路光信道的传输码率

国外在80年代基本是采用这种方法提高容量,现在仍有人在从事这方面的研究,并取得了显著的成绩。目前,由于电子技术水平的限制,我国绝大多数干线通信系统中每芯光纤仅可传输1920路话路(140兆比特/秒),国外目前每芯光纤可传输3万多话路(2.488吉比特/秒),甚至可达12万多话路(5吉比特/秒,TPC-5)。高于此传输码率的通信系统尚未达到商用阶段。正在研究中的高传输码率通信技术可使每芯光纤传输容量达240万话路(200吉比特/秒)。但用这种方法提高传输容量受到当前电子技术水平及当前使用的光纤的色散性能的很大限制。对世界各国普遍采用的铺设长度已达6000万公里的常规光纤(即在1300纳米波段色散最小的光纤)来说,要进一步提高容量势必对电信器件的要求非常苛刻,并需采用专门的光纤通信系统技术来克服光纤色散的影响,成本将不得不提高。另外,同国外电子技术水平相比,我国还存在着一定的差距。因此对我国来说,用这种方法提高光纤传输容量,与高码率技术相应的电信设备势必主要依赖进口。这对发展我国独立自主的民族工业和通信产业十分不利。

2. 采用波分复用(WDM)技术

90年代以来,光纤通信中的高密度波分复用技术已形成一个热点。它能在原有设备的基础上增加通信容量数倍到十数倍。光纤放大器和大功率泵浦

激光器的商用化为该项技术在1550纳米波段光通信中开创了广阔的应用前景,并给光纤通信带来了划时代的影响。因此,采用光纤放大器的波分复用通信技术(简称“波分复用+光纤放大器”,即“WDM+EDFA”)被人誉为“下一代的光纤通信技术”。

一、“WDM+EDFA”通信系统原理

所谓波分复用技术即是由原一芯光纤中布置一路光信道变为在一芯光纤中布置几路到十几路光信道。这些光信道的波长互不相同,配之以带宽为30纳米到35纳米的光纤放大器,原则上可以增加到20个光信道,甚至更多,即通信容量可增加到原来的20倍左右,可以较充分地利用光纤在1550纳米波段这个低损耗的通信窗口。

光纤放大器是通过内部一段掺铒光纤将波长为980纳米或1480纳米泵浦激光器的能量转移到我们所需要的1550纳米波长左右,使这个波段弱的光信号得以“放大”。由于980纳米波长泵浦激光器生产工艺的日渐成熟而使该波长泵浦激光器寿命更长,功率更大,性能更稳定。还由于它具有比1480纳米波长泵浦激光器有更高的能量转移效率、更低的噪声和更低的泵浦光串扰效应,而有逐渐占泵浦激光器主导地位的趋势。光纤放大器的寿命主要取决于泵浦激光器的寿命,通常它能达到10万小时左右。

图1为传统光纤通信系统示意图,它目前仍在世界各地广泛使用。每经过大约50公里中继距离需要由一套光电中继器将上一站传送过来的光信号变为电信号,经过放大、整形等技术处理,再转换成光信号,继续传输大约50公里中继距离。以后不断中继,直到目的地接收端。每信道的传输容量由这条光信道的传输码率决定。如果有几条信道,则需要几套同样装置,如N条光纤,N个中继器等。

图2为仅采用波分复用的光纤通信系统示意

图。同图 1 相比,它虽节省了 $(N-1)$ 条光纤,但在继电器前后端增加了分、合波装置。各信道必须先分路,再分别接中继器,然后再合路。结构相当复杂,而且分路、合路不可避免地带来损耗,使中继距离缩短。因此,在光纤放大器出现并实用化之前,波分复用技术不适合在通信干线中应用。

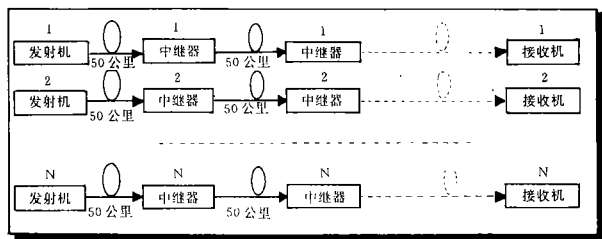


图 1 传统光纤通信系统示意图

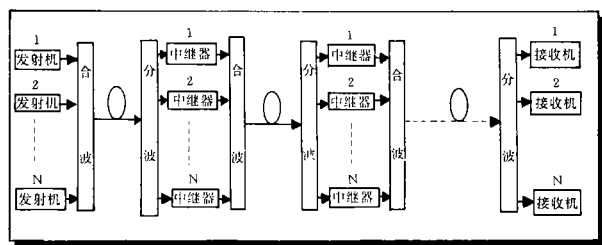


图 2 波分复用光纤通信系统示意图(无光纤放大器)

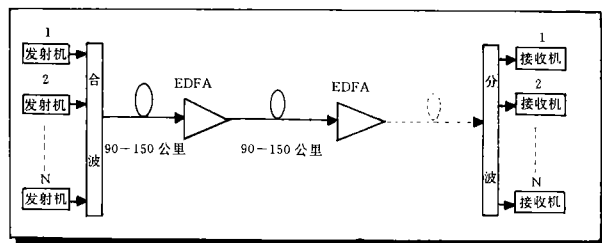


图 3 采用光纤放大器的波分复用光纤通信系统

图 3 为采用光纤放大器的波分复用光纤通信系统示意图。它同图 1 所示的传统光纤通信系统相比有下列优点:

1. 以一芯光纤代替了 N 芯光纤,但达到了同样的传输容量。
2. 光纤放大器之间的间隔可达 $90 \sim 1540$ 公里,且光纤放大器体积小,结构简单。每只光纤放大器可取代 $2N$ 套或 $3N$ 套结构复杂、体积庞大的光电中继器,并可减少中继站的数量。
3. 显而易见,假如图 1 中每芯光纤传输码率相

同,则图 3 中每芯光纤中的传输容量增加了 N 倍。换一种说法,假如图 1、图 3 两系统中总的传输容量相同,则图 3 中“波分复用+光纤放大器”光纤通信系统每信道传输码率可以较低,因而在技术上易于实现。此时光纤色散的影响也较小,适合电子技术尚未达到发达国家水平的国家和地区开发利用。

4. 在网络系统中使用波分复用技术,可以增加网络的灵活性和可靠性,甚至实现大容量的光交换。

5. “波分复用+光纤放大器光纤通信系统”的传输透明度高,这主要由于该系统(不包括在两端的光端机):

(1) 可以传输数字信号、模拟信号,或任何调制的光信号;

(2) 可以传输任何速率的数字信号;

(3) 可以传输任何编码制式的信号,如准同步数字体系(PDH),或同步数字体系(SDH)。

这样的系统非常适宜于更新换代。例如,提高原有系统的传输码率,或由准同步数字体系(我国目前仍使用这样的体系)变换为世界上将广泛使用的同步数字体系(SDH)时,只需要更换线路两端的光端机即可,不需要更换光纤放大器。如采用图 1 中的传统光纤传输系统,则在传输内容有任何变化情况下,需更换全部中继器,甚至需改变相邻中继器之间的传输距离。这样的光纤通信系统在升级换代过程中,必然需要大量投资和较长的工期。

由上述比较可见,采用光纤放大器的波分复用光纤通信系统的经济效益是明显而又巨大的。以我国“九五”计划在 2000 年以前将再铺设 8 万公里光缆为例,按铺设 30 芯的光缆计算,每公里光缆约 5 万元,但如采用 4 路波分复用技术,则采用 6 芯光缆即可,仅光缆一项便可节省投资近 28 亿元。如已铺设好的光缆的传输容量已饱和,须另铺设光缆,采用波分复用技术则可节约更大的投资。复用的信道数越多,则经济效益越明显。另外,在系统更新换代中因缩短施工工期所节省的时间也包含了巨大的潜在的经济效益。

二、国外“WDM+EDFA”通信系统发展状况

波分复用技术作为开发单模光纤的低损耗窗口的一项重要技术很早就被提出来了。人们首先提出了 1300 纳米波长和 1550 纳米波长之间的波分复用方案,并达到实用化。但此种方案只能实现二路信道复用,不能充分开发单模光纤的低损耗窗口。80 年代提出来密集型波分复用技术方案(即信道波长间距较小),其中包括了相干和非相干频分复用技术。这些技术在实验中得到证实(见表 1)。

表 1

	公司	信道数	传输码率	信道间距
1985	AT&T	10 路	2 吉比特/秒	1.5 纳米
1986	HHI	10(128)路	70 兆比特/秒	6 吉赫
1987	BCR	18 路	2 吉比特/秒	2 纳米
1988	BCR	16 路	2 吉比特/秒	2 纳米

表 2

	1990	1991	1992	1993	1994	1994	1995	1995	1995
公司	KDD (日)	BTL (英)	AT&T (美)	AT&T (美)	AT&T (美)	Alcatel (法)	NTT (日)	AT&T (美)	AT&T (美)
信道数	4	16	4	8	8	16	16	8	17
码率 (吉比特/秒)	2.49	2.49	1.7	10	20	2.488	10	20	20
信道间隔 (纳米)	2			1-2	0.9	1.6	0.64	1.6	0.8
EDFA 数量	6	10	13	6	8	4	29	9	4
传输距离 (公里)	459	527	840	280	300	440	1000	232	150
总容量 (吉比特/秒)	10	40	6.8	80	160	40	160	160	340
备注	早期实验		现场实验			增益平坦 型 EDFA			

不能做到单信道传输这么高的信息容量。

现在,在实验工程中利用“WDM+EDFA”技术的时代已经来临。1995 年国际光纤通信会议(OFC'95)已报道了美国 AT&A 贝尔实验室在原有的一芯光纤单储备道 2.488 吉比特/秒、4 200 公里长的 American-IN 海底光缆上加上了第二路 2.488 吉比特/秒传输速率的信道。这样就实现了 2 路“WDM+EDFA”、传输距离为 4 200 公里的光纤通信系统。每信道误码率均优于 10^{-12} 。在免去重新铺设海底光缆的情况下,传输容量增加了一倍。据美国 AT&T 贝尔实验室光波系统研究部主任厉鼎毅博士在《全球超级高速信息公路的下一代光通信系统》(《电子展望与决策》,1994 年 5 月)一文中指出:“1995 年以后,美国将采用光放大波分复用系统”。1995 年先使 OC-48 光同步数字系列容量扩大 N 倍($N \times 2.488$ 吉比特/秒)。1995 年以后将使 OC-192 光同步数字系列容量扩大 M 倍($M \times 10$ 吉比特/秒)。

三、“WDM+EDFA”光纤传输系统研究中的关键技术

1. 光源及其波长控制

由于波分复用系统的各频道波长间距常在纳米量级,例如 0.8 纳米到 4 纳米,普通法布里—珀罗腔(F-P)激光器在调制后频谱太宽,易形成频道

到 90 年代,国际上开始有了“采用光纤放大器的波分复用通信系统”的实验报道(其中著名的见表 2)。

从表中可见,通过波分复用技术,每芯光纤中传输的信息容量愈来愈大,1995 年已达每芯 340 吉比特/秒的实验结果。目前世界上用高码率技术尚

串扰,不适合在波分复用系统中使用。波分复用系统中使用的光源主要是单频动态单模激光器,如分布反馈激光器(DFB)或分布布拉格反射激光器(DBR)。用分立的激光器作为光源时,必须挑选波长以满足波分复用要求。由于激光器波长漂移可能引起频道间串扰,因而需要作波长控制,稳定频道间的间隔。

近来有人研究利用激光器阵列作波分复用系统的光源。即在制作激光器阵列时同时就控制激光器制作工艺以使各激光器的波长间隔满足波分复用系统的要求。这样一个激光器阵列,就代替了一系列分立的激光器。对激光器阵列中的各激光器来说,环境温度是同步变化的,因而阵列中激光器波长间距可稳定不变。使用这种阵列的系统有可能不需波长控制,因而具有明显的优点。但由于这样的激光器阵列仍处于研制阶段,成品率较低,成本高,目前尚未达到商用水平。

2. 合波与分波技术

在单频道光纤传输系统中,一根光纤只传输一个波长的光信号,不需合波与分波。而在波分复用系统中,则须把来自不同光源的不同波长的光信号耦合到一芯光纤中去,在接收时再将它们分开,分别接收、解调,取出所需的信息。这需要完善的合波和分波技术。对于合波器和分波器的要求是:经济、有效、稳定、插入损耗小、分波器信道间串扰小。但

在设计系统时常须在这些综合因素中选取最佳值。例如,为了降低成本,在频道数不太多的情况下,可选用光纤耦合器作合波器。用作分波器的器件有光栅分波器、光纤法布里—珀罗腔(F—P)、光纤布拉格光栅分波器和液晶可调谐法布里—珀罗腔(F—P)等。

3. 信道均衡问题

由于普通光纤放大器的增益谱不平坦(即对不同波长的光信号放大倍数不一致),因而某些信道的信号在经过级联的多个光纤放大器后,就有可能因强度不够而使接收端不能正确接收传输过来的信息。解决这一问题的方法,可用光纤放大器外光路均衡法或光纤放大器内光路均衡法。

外光路均衡法就是在各信道上分别加光衰减器,调节光衰减器值,使各信道输出端信噪比一致,使各信道工作状态处于最佳。

内光路均衡法包含下列两个方法:

(1)在光纤放大器内加滤波器。例如,在光纤放大器内加双芯光纤滤波器,可使光纤放大器增益谱变平坦。

(2)改变光纤放大器中掺铒光纤的基质材料。例如,用ZBLAN 氟玻璃基质代替硅玻璃(石英玻璃)基质,也可命名光纤放大器增益谱变平坦。

4. 光纤色散问题

当前工程使用的光纤都是常规光纤,即非色散位移单模光纤(NDSF)。其色散零点在波长1300纳米附近。但通信工程使用的光纤放大器工作波长为1550纳米左右。在这一波段,常规光纤的色散比较大,其结果是光学脉冲在光纤中传输一段距离后,脉冲将被展宽。当光学脉冲展宽为原脉冲宽度的1.1倍时,可认为是由光纤色散所限制的传输距离的极限。根据这一条件,传输码率为140兆比特/秒、622兆比特/秒和2.488吉比特/秒的光信号在光纤中传输最长的距离分别为1.32万公里、674公里和42公里。可见传输码率越高则光纤色散影响越大。

为了解决这一问题,有人设计了色散位移光纤(DSF)。但是这种光纤在零色散点处由于非线性效应(如四波混频等)又可能引起强的频道间串扰。因此有人又提出了色散管理方案,既解决了色散问题,又解决了非线性问题。光纤色散问题是系统在高码率传输下必须解决的重要问题。

5. 光纤非线性问题

受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、四波混频(FWM)等光纤非线性现象是光纤通信系统中的重要问题。它们的存在可能引起波分复用系统中的信道间串扰。

光纤中的四波混频效应是由三阶非线性极化率引起的。由于三阶极化率比二阶极化率小得多,

而且四波混频要求相位匹配,这在常规光纤中难以实现,因而光纤中的四波混频可以忽略。当传输码率较高,必须使用色散位移光纤(DSF)时,四波混频可能会产生重要影响,引起信道间串扰。但如采用上面所述色散管理方案,可解决这一矛盾。

受激布里渊散射具有很低的临界功率,当光功率达到毫瓦量级时就会出现明显的效应,引起信道间能量的转移,即所谓的“频移”现象。但由于受激布里渊散射引起的频率转移较小,对石英光纤而言,频移小于11吉赫(小于0.1纳米)。波分复用系统的信道波长间隔均大于此数,因此受激布里渊散射对波分复用系统也不会造成任何影响。

但受激拉曼散射是入射光波与光纤晶格中格波的光学波分量相互作用产生的。它使短波长的能量向长波长转移,且频移可能很高,有可能对波分复用系统造成影响。它将限制波分复用系统的信道数和每信道的功率。波分复用系统中光纤放大器可能使光纤中传输的光信号功率增强很多,因而光纤非线性效应在光纤通信中的影响变得很重要。

6. 系统监控技术

该技术是使通信系统实现工程化的关键技术之一。该技术的实现将可监测和控制系统中各光纤放大器和各光端机等系统的工作状态,防范故障于未然,在出现故障时迅速找出系统中的故障并排除故障。

四、“WDM+EDFA”光纤传输系统的实例

作为一个实例,这里介绍北京大学区域光纤通信网及光纤通信系统国家重点实验室研制的8×140兆比特/秒、151公里光纤传输系统(见图4),其主要技术指标如下:

频道数	8
波长间隔	2纳米及其倍数
波长范围	1531~1561纳米(本系统采用波长为1531纳米、1533纳米、1535纳米、1537纳米、1539纳米、1543纳米、1545纳米和1549纳米)
传输码率	140兆比特/秒
传输码型	CMI, ²³ —1 PRBS
光纤放大器数量	2
传输距离	35.5公里+66.6公里+48.8公里 =151公里
系统误码率	$1.6 \times 10^{-12} - 0 \times 10^{-15}$

8个信道光信号分别经140兆比特/秒CMI码调制后进入一个8×2光纤耦合器进行合波,该耦合器每频道损耗为10分贝。从合波器出来的光信号分成两路,一路由计算机采集各频道光信号波长后进行波长自动闭环控制;另一路通过35.5公里

的光纤传输后经第一光纤放大器放大,继续经过 66.6 公里光纤传输,又经第二个光纤放大器放大后,再传输了 48.8 公里,最后经光栅分波器将各频道信号分离后分别同时送入 8 套接收机。总传输光纤长度为 151 公里,输出功率分别为 14.3 分贝米和 12.8 分贝米的在线光纤放大器配置有外接光隔离器。分波器为光栅型分波器,每光信道半功率宽度为 0.7 纳米,插入损耗小于 3 分贝。发射端机和接收端机是传输码率为 140 兆比特/秒的商用端机。

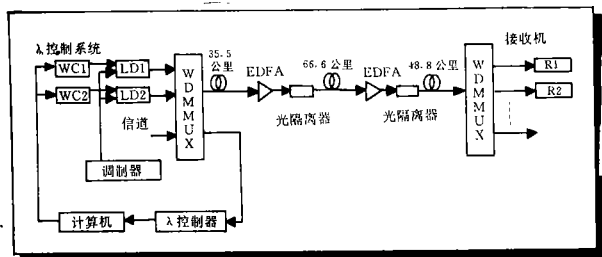


图4 系统原理框图

封底照片显示了 8 路波分复用信号的频谱图。从照片中可清楚看到一根光纤中同时存在 8 个波长的信号,每个波长的信号对应一个信道。它们都有大于 10 分贝的信噪比。系统中还使用了自己开发研制的双记忆波长自动控制装置,解决了影响该系统长期稳定工作的关键问题,其主要指标已达到实用要求,其中误码率(系统最主要的指标之一)可达 1×10^{-14} ,即传播 10^{14} 个信息单元而不出现一个错误。该系统已在实验室正常运行了 3 个多月。

1994 年 11 月国家经贸委、国家科委和电子部共同委托国家教委对该系统进行了鉴定。参加鉴定的专家对这项成果给予了高度评价,一致认为:“该系统为国内首次实现的复用频道数最多(8),传输距离最长(151 公里),具有波长自动控制和初步监测功能的光纤传输实验系统。该系统在密集波分复用和光纤放大器的主通道系统集成技术方面达到了国际 90 年代初水平。”参加鉴定的专家还认为,

该系统稳定可靠,可以很快投入实用,使我国的光纤通信技术赶上发达国家的水平,并对未来我国“信息高速公路”的建设具有重要的意义。

五、展望

信息产业是后工业社会的先导产业。信息产业的意义不仅表现在它在国民经济所占的相当大的比重,而且表现在它对整个国民经济的“促进”和“诱发”作用。电信产业作为信息产业的主要部分,已经成为现代国民经济的命脉。在世界范围内它是少有的、始终处于高速增长的产业门类。据联合国教科文组织统计,全球范围内的信息量正以 30% 的年增长率递增。在全球话音业务继续增长的同时,非话业务(主要包括图像、数据、文本,以及电视节目等传送业)将会以更高速度增长,即非话业务的年增长率(20%)将是话音业务(4%)的 5 倍。到 2000 年,非话业务将占电信业务的 50%。现在美国长途通信量总数是 140 吉比特/秒左右,90% 以上是话音业务。据估计 2000 年将为 200 吉比特/秒,2010 年将为 1 000 吉比特/秒,2020 年将超过 3 000 吉比特/秒。其中大多数属于数据和宽带业务。如此迅速的发展和变化,即使发达国家的现存通信网也是难以承受和适应的。这正是美国及其它各国相继提出建设“信息高速公路”设想的根本动因。

我国电信网络、技术和业务近年来得到了迅速的发展。长话电路 1978 年 1.9 万条,到 1993 年发展到 42 万条。在“八五”期间要建成 22 条长途光缆干线。1993 年电信业务量增长近 70%。随着国民经济的高速增长,各种电信业务仍远不能满足国内需要。因而,必须进一步大幅度地增加我国通信网的传输容量。为实现这一目标,在继续注意发展高码率光纤通信技术的同时,必须高度重视此 90 年代初才趋于成熟的新一代的“WDM+EDFA”光纤通信技术,并迅速将其应用于我国各级光纤通信网络。这将是一条适合我国国情的,而且经济有效的发展通信产业的途径。(责任编辑 王宏章 冷远猷)

(上接第 54 页)

数据来自当地环境和所用的测量设备均无变化的气象站。他们的研究提供了印度洋深处变暖的第一手资料。位于澳大利亚塔斯马尼亚州的霍巴特的南极和南部海洋环境合作中心的纳森·宾多夫(Nathan Bindoff)把 60 年代初期和中期穿行印度洋的船只上记录的温度数据与 1987 年达尔文号考察船记录的数据相比较。他计算出在南纬 32°,250~1 500 米海洋深处的温度上升了大约 0.5℃。

宾多夫认为,海洋深处温度的这种变化是全球气候

总变化的重要标志。他指出,当测量海洋深处温度时,季节性波动很小。这意味着与在海平面测量相比,较少的观测能获得较准确的结果。又因为海洋有很大的储热容量,所以温度略有上升就意味着巨大热量输入。

印度洋是已证明其深水正在变暖的第三个大洋。1992 年,宾多夫公布了类似的事实证明,西南太平洋温度几乎以同样的速度上升。今年早些时候,西班牙海洋学研究所的格里高里奥·帕里拉(Gregorio Parrilla)率领的研究小组发现北大西洋也在变暖。(肖庆山)