

160×10Gb/s C+L 波段 3040km 无电再生光传输系统的研究与实现

杨 铸¹, 张 强², 刘贤炳², 席申娥², 曾 晖², 杨 宁², 印新达³

(1. 武汉邮电科学研究院, 湖北武汉 430074; 2. 烽火通信科技股份有限公司, 湖北武汉 430074; 3. 武汉光迅公司, 湖北武汉 430074)

摘 要: 大容量超长距离(U LH) 传输是一种非常有应用前景的技术, 本文介绍 160×10Gb/s C+L 波段 3040km 实际光纤的无电再生光传输系统的研究和实现. 系统波道间隔为 50GHz, 波道速率 10.7Gb/s, 发送采用 CS RZ 码, 具有超强 FEC 功能, 光信噪比大于 15dB. 国内首次成功在实际光纤传输 3040km 的 C+L 波段 10Gb/s 信号, 首次将 C+L 宽带喇曼光纤放大器应用于 ULH 系统, 连续 24 小时无误码. 取得的有实际意义的试验成果为我国的 ULH 系统的应用, 提供了系统的性能、指标、参数、标准等实验依据.

关键词: 10Gb/s 波分复用系统; 超长距离传输 (ULH); 10Gb/s 光纤超长距离传输; 载波抑制归零码 (CS RZ); C+L 波段光传输; C+L 波段的宽带喇曼光纤放大器

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2004) 12A-061-05

Research and Realization of 160×10Gb/s 3040km Optical Transmission System without Electronic Regeneration in C+L Band

YANG Zhu¹, ZHANG Qiang², LIU Xianbing², XI Shene², ZENG Hui², YANG Ning², YIN Xinda³

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Fiberhome Telecommunication Technologies CO., Ltd, Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Aclink Technologies Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The large capacity ultra long haul (ULH) transmission is a very promising technology for future. This paper introduces the research and realization of 160×10Gb/s actual 3040km optical fiber transmission system without electronic regeneration in C+L Band. This system uses the channel interval 50GHz, line rate 10.7Gb/s, adopting CS RZ (Carrier Suppressed Return Zero) as the line code and super FEC (Forward Error Correction), with OSNR (Optical Signal Noise Ratio) being larger than 15dB. Moreover, in the nation it first achieves successfully 10Gb/s signals in C+L band transmitted in an actual 3040km G.652 fiber line, and in the nation it first employs the C+L band distributed Raman fiber amplifier on the ULH system, and the system runs error free for continuous 24 hours. These achieved practical significant experimental results offer the experimental foundations for studying the system performances, parameters, characteristics and standards for ULH system applications.

Key words: 10Gb/s wavelength divided multiplexer system; ultra long haul (ULH); 10Gb/s ultra long haul optical transmission; CS RZ (carrier suppressed return zero); C+L band optical transmission; C+L band Raman fiber amplifier

1 引言

高速率、大容量的光纤传输网络是组成国家信息基础设施的主干道. 人类社会不断发展, 正在出现的宽带业务, 特别是不可想象的因特网将极大地增加公用网的业务量, 还会要求更高速、更大容量的传输手段. 骨干网容量提高迅速, 每年扩容主要为了因特网的数据业务, 一年甚至 10 个 10Gb/s 波长, 近期内这种增幅不会减小.

对于传统的电话网络, 由于业务量主要集中在本地, 对超长距离 (ULH, Ultra Long Haul) 无电再生系统的需求并不十分迫切. 但是, 随着全球信息化的发展, 因特网业务增长速度已达到每六个月就要翻一翻, 现已大大超过了电话用户和电话业务量的增长速度. 因特网业务流量是全球性的, 很少局限于本地, 因为人们浏览网页、下载软件并不限于本地的几个网

站, 一般都是国际性的, 而且使用频率远远超出使用国内、国际长途电话的频率. 因此, 因特网流量的迅速增长使当今的电信网络面临严峻的挑战. 人们对带宽永无止境的需求, 一方面要求电信骨干网络畅通无阻, 另一方面还需要尽快解决接入瓶颈问题, 真正实现宽带通信. 随着 Internet 业务量的迅猛增加, 不少大城市之间已经开始需要有高速直达传输线路, 而两城市之间有可能相隔数千公里 (例如从哈尔滨至昆明大约 6000km). 如果采用常规的密集波分复用 (DWDM) 系统进行传输, 每隔 640km 左右, 就要进行一次光-电-光 (O-E-O) 的信号再生, 网络建设成本和维护成本将是非常昂贵的, 此时能够传输数千公里而不需要电再生的 ULH DWDM 系统将十分受欢迎. 我国幅员辽阔、人口众多, 未来五年, 中国的信息产业将保持 20% 以上的年增长率, 规模比 2000 年翻一番. 在我国, 当前比较突出的问题是接入瓶颈问题, 不难想象, 一旦接入瓶颈有

所缓解,骨干网络的压力将会越来越大.超长距离传输系统 ULH+ OADM,可以使网络层次更加简化,有利点到点的灵活、可靠、方便业务传送,具有非常广阔的市场前景.

武汉邮电科学研究院在“863”计划的资助下,在国内首次实现了 $160 \times 10 \text{ Gb/s C+L}$ 波段 3040km 无电再生光传输系统,本文介绍 ULH 系统的研究和实验情况.

2 喇曼放大技术的应用

在 ULH 传输中,喇曼光纤放大器技术是近几年倍受人们瞩目的光传输技术,它具有掺铒光纤放大器(EDFA)不具备的优良特性,可以放大 EDFA 所不能放大的波段;并且利用普通的传输光纤就能实现分布式放大,从而大大改善光信噪比(OSNR).ULH 实验系统采用自主研制的具有商用水平的宽带分布喇曼光纤放大器,主要关键技术如下.

2.1 多波长泵浦与增益平坦问题

喇曼放大器是以光纤作为增益介质,增益系数与光纤参数有关,单一泵浦情况下,在泵浦频率下移 13.2THz 附近有一增益峰值,带宽约 4THz,但并不平坦.喇曼光纤放大器特点之一是通过多波长泵浦实现增益平坦,但是采用的波长太多会降低喇曼泵浦源的利用效率,并且给泵浦合波带来不便;采用的波长太少会使增益平坦性能降低,进而会影响系统性能.针对 C+L 波段,如果系统对增益平坦要求不高,采用三个泵浦波长;如果系统对增益平坦度要求较高,则采用四个泵浦波长.

考虑到传输线路中,信号本身的受激喇曼散射效应(SRS)导致了长波长的信号光的光功率比短波长的信号光功率要大,因此在设计喇曼光纤放大器时最好能够弥补信号本身之间的 SRS 造成的信号光功率不一致,即使长波长信号的增益小于短波长信号的增益,最终使得长波长与短波长的信号功率一致.如果使增益斜率控制也比较容易实现则最好选用更多的泵浦波长,如采用六波长泵浦方案.综合考虑增益平坦、泵浦效率与增益斜率控制,最终选择四波长泵浦方案,并采用了具有专利技术的背光监测反馈环技术及其控制电路,达到

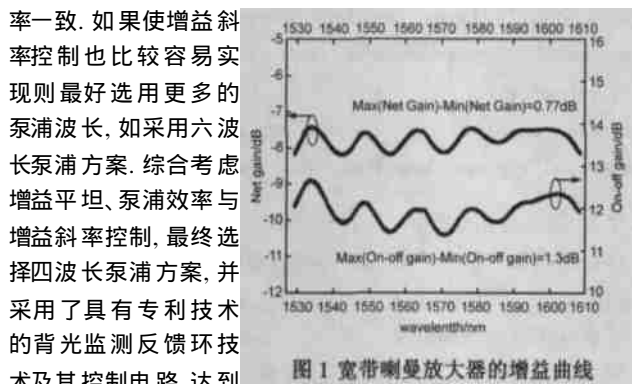


图1 宽带喇曼放大器的增益曲线

整个 C+L 波段的增益平坦度小于 1.2dB, 实际测试的喇曼放大器的增益谱见图 1.

2.2 喇曼增益的偏振相关问题

喇曼放大增益依赖于信号与泵浦光的偏振态,泵浦光与信号光偏振方向相同时,增益最高,正交时增益很小.信号光在光纤中传输时偏振方向有一定的随机性,为了使放大器增益与信号光的偏振无关,必须去除泵浦光的偏振性.

传统的方法,用两个较小功率(100~150)mW 波长相同的泵浦进行偏振复用,使增益介质中相互垂直的两个电场方向的泵浦功率大致相等,这种方法有明显的缺点:

(a) 本质上不是对泵浦激光器的消偏,而且增加了激光器的

个数,增加了系统成本和复杂性.

(b) 要求同一波长的两个偏振方向不同的激光器的功率完全相同,增加了控制的难度.如果其中一个激光器的功率降低或失效,就会影响喇曼光纤放大器的偏振相关增益(PDG)特性.

我们使用具有专利技术的低偏振度的喇曼泵浦源.它是用一个功率较大的激光器(200mW 以上)外加两段保偏光纤(1~4)m 来完成两个或者多个泵浦激光器的合波与消偏实现,很好解决了喇曼放大器的增益偏振相关(PDG)问题,信号增益偏振相关度 $\leq 0.1\text{dB}$.且开发出了基于晶体材料的泵浦消偏器件.

2.3 分布喇曼放大器应用的安全问题

由于喇曼放大器的输出功率已达 +29dBm,接近 1000mW,因此安全性是一个十分重要的问题,它对人员和设备的危害性远远超过 EDFA.

在喇曼放大器的实用化进程中,高功率泵浦源对设备特别是对光纤线路和光连接器的损伤首先被考虑.人们非常担心,喇曼放大器在长期工作中是否会将线路中敷设的传输光纤烧毁.实验表明,对于 G.652 光纤,引起光纤熔化开始传播的 1467nm 泵浦光门限功率分别在 1400mW 以上.而目前喇曼泵浦模块的输出功率通常不超过 1000mW,不会烧毁传输光纤.烽火通信公司在工程中应用的喇曼放大器,已正常工作了近两年.在应用中需引起特别注意,WDM 系统中,当输出功率超过 20dBm 时,活动连接器不注意清洁就会损坏.

喇曼泵浦的输出光功率通常达到了 IEC 60825 规定的 3B 类危险等级,必须进行安全控制,避免强大的泵浦光直接辐射到空中,伤害人的眼睛或皮肤.针对系统维护人员的安全问题,研制的喇曼光纤放大器设计有泵浦自动开关的功能,当光纤线路断裂时喇曼光纤放大器就会通过无光告警使泵浦激光器由正常工作状态自动切换到眼保护模式工作状态,当线路恢复时喇曼光纤放大器又会通过信号检测使泵浦激光器由眼保护模式自动切换到正常工作状态.这在很大程度上保证了系统维护人员的人身安全,同时也给系统维护人员带来了极大的方便.

IEC 60825-2 规定:设备的危险等级在受限地点不能超过 1m,在受控地点不能超过 3B.因此,功率水平在受限地点超过 1m 或者在受控地点超过 3B 危险等级的系统,需要实施 APR (自动功率降低)进程,确保在光纤通道上出现故障时激光器功率降到合适的安全功率以下.应用喇曼放大器的光系统不同于常规的光放大系统,在一段链路的接收侧可能出现泵浦激光器,它朝光纤链路后向发射高的光功率.为了保证从断裂或开放的光纤连接中发出的功率位于安全水平,不仅要降低主信号源的功率,也要降低所有相关的喇曼泵浦激光器的输出功率.所以,新的 ITU-T G.664 建议对包含喇曼放大的系统如何实施 APR 进程作出了详尽的描述.

系统中包含分布喇曼放大后,APR 的实施会出现新的问题. APR 的依据是出现光功率丢失,但加入喇曼泵浦后,即使真正出现信号光功率丢失的情况,接收端也不容易发现.因为强大的喇曼散射噪声以及泵浦光的泄漏足以使接收端误以为收到的是信号光功率.由于噪声功率和信号功率可能处于相

同水平, 单靠设置光功率门限来判断是否出现信号丢失是行不通的, 必须采用专门技术处理这个问题。我们研制出具有专利技术的喇曼噪声滤波器, 很好地解决了 APR 的依据问题。

2.4 实验中的分布喇曼光纤放大器的主要性能特点

①采用多波长泵浦技术, 以及具有专利技术的背光监测反馈技术及其控制电路, 使喇曼放大器在 C+L 波段 (1527~1607nm) 具有平坦的增益, 增益平坦度 < 1.2dB。②喇曼源的输出光功率 > 700mW (+28.45dBm)。③采用具有自己专利的去偏振技术, 使喇曼放大器的增益与信号偏振无关。喇曼源的总输出偏振度 < 5%, 单个泵浦 LD 的输出偏振度 < 7%。④信号增益偏振相关度: < 0.1dB。⑤低噪声, 等效噪声指数 < -0.5dB。⑥泵浦输出功率监测与控制、泵浦激光器偏流监测、TEC 温度监测、外壳温度监测、泵浦人工关断与自动关断等功能, 提供泵浦电流、泵浦温度、泵浦温度告警以及泵浦人工关断告警等。

3 利用宽带喇曼放大器的色散管理技术

传统的 C 波段 (1530nm~1565nm) 应用已非常成熟。随着大容量传输的需求, L 波段 (1570~1605nm) 业已商用。大容量传输, 要求信道容量, 因此每波道的传输速率也高。当 DWDM 中单波道的速率达到 10G/s 及以上, 色散对信号传输的影响非常显著, 传输距离越长, 影响越大。必须对系统进行色散补偿, 即在系统上增加色散补偿器。

对宽带 (例如 C+L 波段) 的色散补偿器的损耗补偿, 采用宽带的光放大器, 如宽带喇曼光纤放大器是最适合的, 利用其宽带特性, 色散补偿同时对 C+L 波段, 这样不需要分为 C 波段和 L 波段进行色散补偿, 即对同样的光纤线路, 只需要一份 FPDC, 而不需要两份 FPDC (C 波段部分和 L 波段部分), 可以节省系统的成本。

利用宽带喇曼放大器的色散管理方式在系统中的应用如后面图 4, 采用同时补偿 C+L 波段的色散补偿模块, 3000km 传输要求色散补偿模块的色散偏差为 ±0.35ps/nm/km。

4 PMD 对 ULH 传输的影响

系统实验表明当光纤满足 PMD 系数小于 0.1ps/√km, 即整个光纤链路的路径 PMD 系数小于 0.2ps/√km, 则 PMD 对 ULH 系统在 3040km 以内的影响可以不予考虑。或者说, 要开通 10G/s ULH 系统, 应选择 PMD 系数小的光纤。

系统设计需考虑用 1/2 的 PMD 指标留给链路中的光器件 (包括色散补偿器)。

微分群延时 Δτ 为

$$\Delta\tau = \text{PMD} \times \sqrt{L},$$

Δτ 的单位为 ps, PMD 的单位是 ps/√km, L 的单位是 km。

对 G.652B、G.652D 和 G.655C, 它们的最大

$$\text{PMDQ} = 0.2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}.$$

则 $L = (1\sqrt{\text{PMD}})^2 = (1\sqrt{0.2})^2 = 5625\text{km}$ 。

我们利用 EXFO 公司的色散分析仪 (TK-CB-03-PMDB XX), 对采用的 3040km 光纤线路进行 PMD 测量。PMD 延迟为 7.167ps, PMD 系数为 0.1300ps/√km; 二阶 PMD 延迟为

23.793ps/nm, 二阶 PMD 系数为 0.0078ps/√km·nm。我们采用的光纤是优于 G.652B 的, 注意到 PMD 系数为 0.1300ps/√km 是包括了线路中所有光器件的, 即 RFA、EDFA、DCM、C/L 合波器和分波器。所以整个系统受 PMD 的影响非常小, 可以忽略。

5 CS-RZ 码在 ULH 系统上的应用

调制技术是高速系统中的关键技术之一。传统的调制格式主要有 NRZ 码和 RZ 码。随着对调制技术研究的深入, 新的调制格式不断被提出, 载波抑制归零码 (Carrier Suppressed RZ) 就是其中的一种。在同时考虑色散和非线性效应时, CS-RZ 传输性能最优。应用 CS-RZ 码时, 要注意色散补偿应比 NRZ 码的量。

CS-RZ 码是由两个马赫曾德尔强度调制器级联调制而产生。可以得出 CS-RZ 的频域表达式为^[1]

$$E_{\text{CS-RZ}}(\omega) = j2m\pi \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1} \frac{\pi}{2} \{ E[\omega_c + (2n+1)\omega_0] - E[\omega_c - (2n+1)\omega_0] \}$$

ω_c 为载频, ω₀ 为时钟频率, $E(t) = \text{sip}[(\pi/2) \sin(\omega_0 t)]^\circ$ 。由式中可以看出发载频 ω_c 处没有频率分量, 即载波被抑制。

实际测量的 NRZ 和 CS-RZ 码的光谱比较见图 2 左为 NRZ 光谱, 是单峰, 右为 CS-RZ 光谱, 非常明显是双峰, 载波是凹处

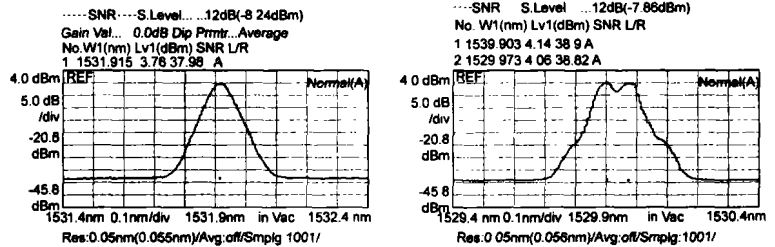


图 2 NRZ 和 CS-RZ 码的测量光谱

(被抑制)。

6 ULH 系统中非线性效应的影响

在 ULH 10G/s 系统中, 受非线性效应影响的主要是 SPM (自相位调制), 其他的非线性效应反应很小。当 DWDM 系统的传输距离小于 640km 时, SPM 的影响较小, 但随着传输距离的增加, SPM 效应具有积累性, 其影响显著。SPM 效应一般只能采用控制入纤功率的方法加以限制。CS-RZ 码具有好的容忍 SPM 的能力, 在相同的功率代价 (误码率 1×10^{-12}), CS-RZ 码的入纤功率高达 6dBm, RZ 码最高入纤功率为 5dBm, 而 NRZ 码只能达到 1.8dBm^[2]。CS-RZ 码相邻的相位交替, 因此 CS-RZ 对自相位调制 (SPM) 的容限大。

7 ULH 系统中的 OSNR

OSNR 指标是 WDM 系统的一项重要指标, 但在高速系统中, 它有时并不能反应系统的实际情况。而在 ULH 系统中, 更是如此。因此, 到目前未见有人报道其 ULH 系统的 OSNR, 认为 ULH 系统可以不考虑 OSNR 指标。我们认为, 虽然 OSNR 不是高速 ULH DWDM 系统的唯一指标, 但它在工程应用中方便测量, 当系统调整后, 它的变化仍在一定程度上反应系统性

能变化,因此还是一个重要的工程指标.

ITU-T G. 692 给出了 MPF R 点 OSNR 的计算公式 (dB 形式). 设 EDFA 增益 G 等于跨距的损耗 L ($G = L$), 并假设 $G \gg 1$, 则,

$$\text{OSNR} = 58 + P_{\text{out}} - L - N_F - 10 \log N,$$

式中, N_F 是 EDFA 的噪声指数, L 是跨距损耗, N 是跨段数. 上式大家熟知的“58”公式.

选择 OSNR 应从两方面考虑. (1) 系统的配置符合实际情况. (2) 系统的误码率得以满足.

从“58”公式可以看出, 如果仅考虑 OSNR, 有几种方法. ①提高每波道入纤功率. 但常常是提高信号的入纤功率虽使信噪比达标, 系统却发生误码; 原因是 ULH 系统对光纤非线性效应更敏感, 入纤功率越高, 非线性效应越严重. 非线性效应具有积累性, 随着传输距离的延长, 非线性效应将更加难以控制. ②减少跨距. 但是, 一是跨距小, 跨段数目 (N) 增加, 光放大器增加, 经济成本大, 二是与中国的城镇分布的地理距离太不匹配, 无人中继站有远供问题. 跨距取 80km 比较适合, 太大了技术指标也做不到. ③三是采用低噪声放大. 采用喇曼技术后, OSNR 的改善与线路的中继段数目无关, 实验表明一般改善 3dB 以上.

OSNR 不是唯一的影响误码率的因素. 对于 ULH 系统, FEC 的应用也是必须的. FEC 的应用, 可以降低系统对 OSNR 的要求. 采用 FEC (OTU2), 线路传输保证 3.5×10^{-4} 就可以满足 FEC 解码后 1.0×10^{-12} 的 BER 要求, 由误码率 BER 与 Q 值及 OSNR 的关系, 此时对应 OSNR 约为 7.16dB, 系统初始须加 6dB 富余量和 2dB 光通道代价, 则为 15.16dB. 综合分析和论证, ULH 系统的 OSNR 指标宜为 15dB.

8 ULH 系统中的色散代价

光通道代价是一个很重要的工程指标. 到目前未见有人报道其 ULH 系统的光通道代价, 认为 ULH 系统必然要用 FEC, 再考虑光通道代价没有意义. 我们认为, 光通道代价仍是衡量系统性能水平的一个重要指标. 光通道代价是系统背对背 (没有光纤线路, 也没有光放大器) 的灵敏度 (没有 FEC) 与系统加光纤线路的灵敏度 (加 FEC) 之差. 背对背测量, 即使加 FEC, 灵敏度的改善并没有达到 FEC 的编码增益, 这是因为, 此时影响灵敏度因素完全是光接收机内部的噪声. 此时加 FEC 测量, 灵敏度曲线有一个门槛 (台阶).

C 波段的 CS RZ 码传输 3040km 的光通道代价小于 2dB, C+L 的光通道代价小于 3.5dB. C+L 波段的难度比 C 波段大, 主要体现在宽带喇曼放大器的运用对超长距离的增益平坦有较大负面影响, 此外为调整色散斜率, 色散补偿模块的运用对整个系统也有负面影响, 因此造成光通道代价大. 但另一方面我们认为, 传输 3040km 后, 光通道代价 3.5dB 时, 接收的灵敏度最差为 18dBm, 这与 10Gb/s 系统, 不用 FEC 的指标相当, 仍可以满足工程应用的要求.

9 3040km 实际长度光纤的实验系统设计及其实验结果

ULH DWDM 系统比常规的 DWDM 系统复杂得多, 主要表现在超长距离 DWDM 光传输所受的物理限制更为严重. 首

先, 无电再生传输 3000km 需要数十个 EDFA 和 RFA, 放大器噪声的积累将变得十分惊人; 其次, 随着传输距离的延长, 光纤的色散与非线性效应将变得更加难以控制. 超长距离 DWDM 光传输问题的复杂性使得系统设计与实现越来越不容易, 常规的设计原则和经验公式仍可以借鉴, 但复杂的理论计算已经变得必不可少. 我们在 3040km 实际长度光纤的实验系统设计中进行了大量的仿真分析工作.

通过前面初步的理论计算和仿真分析, 得出以下初步结论.

(1) 对于 ULH DWDM 系统, 光纤非线性效应的影响非常显著. 由于我们采用 G. 652 光纤传输, 系统设计中主要考虑自相位调制 (SPM) 和相邻信道交叉相位调制 (XPM) 的影响. 考虑非线性效应后, 需要重新考虑光信噪比, 信号的传输受诸多物理因素的限制, 一味追求高 OSNR 是不对的.

(2) RZ 调制格式比 NRZ 格式更有利于超长距离传输.

(3) 即使采用分布喇曼放大技术和 RZ 调制格式, 实现超长距离无误码传输仍然是困难的, 前向纠错技术或超强的 FEC 技术必不可少.

3040km 实际长度 G. 652 光纤的 1.6TH/s WDM 超长距离光传输系统中应用了 38 个宽带喇曼放大器, 78 个 EDFA, 充分验证多级放大器的级联特性. 应用了前向纠错 (FEC) 技术, 研究结论表明, 超过 640km 距离, 没有 FEC 的 WDM 传输是不可靠的. 系统应用 G. 709 标准 FEC 技术, 以及 OTU2 速率 (10.7GHz/s) 的超强 FEC. 系统应用 CS RZ 码和 NRZ 码, 实验指出, 两种码型的色散管理是有区别的, CS RZ 码需要更小的残余色散.

实际 3000km 系统的配置见图 3 每个中继段长度为 80km, 整个光路分为 38 段.

图 3 中, $Q/5$ 合波、分波器表示 50GHz 的 Interleaver (光梳状滤波器), 它将尾数是 00GHz 的波道和尾数是 50GHz 的波道合波或分波输出; C5 合波、分波器表示 C 波段尾数是 50 波道的合波、分波器, 即 C 波段奇数波道号的波道; C0 合波、分波器表示 C 波段尾数是 00 波道的合波、分波器, 即 C 波段偶数波道号的波道; L0 合波、分波器表示 L 波段尾数是 00 波道的合波、分波器, 即 L 波段奇数波道号的波道; L5 合波、分波器表示 L 波段尾数是 50 波道的合波、分波器, 即 L 波段偶数波道号的波道. 由图 3 可以看出, EDFA 是分波段放大的, RFA 是宽带放大的, 色散补偿也是宽带的.

在系统仿真时已经得出 CS RZ 适合 ULH 传输的结论. 除了考虑采用 Raman 放大、增益均衡、前向纠错等技术外, 还需考虑色散补偿与应用 NRZ 码的差异. 从前面的分析我们知道, RZ 码对色散补偿的要求比 NRZ 码严厉, 在系统中采取 100% 补偿的方式, 试验中用的 DCF 为 3100km, 超过 3040km 的 G. 652 光纤.

整个实验的光谱测量图见图 4, 这是发端的光谱. 总的传输 3040km 的光谱如图 5 所示.

结果表明^[3], 传输后 Q 值大于 4.29, OSNR 大于 15dB, 光通道代价小于 3.5dB, 连续 24 小时无误码. 这是国内首次成功实现实际光纤的 C+L 波段传输 3040km, 首次将 C+L 波段的宽带喇曼光纤放大器应用于 ULH 系统, 为我国的 ULH 系统的应用提供了系统的性能、指标、参数等实验依据.

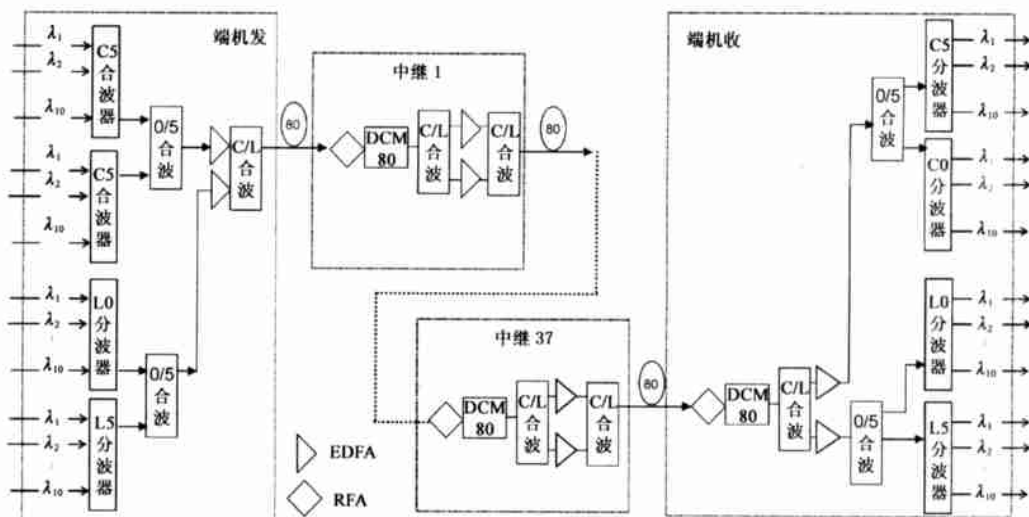


图3 光路配置示意图

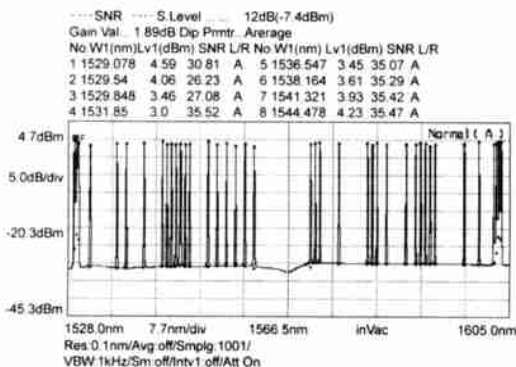


图4 实验中的总(C+L)光谱

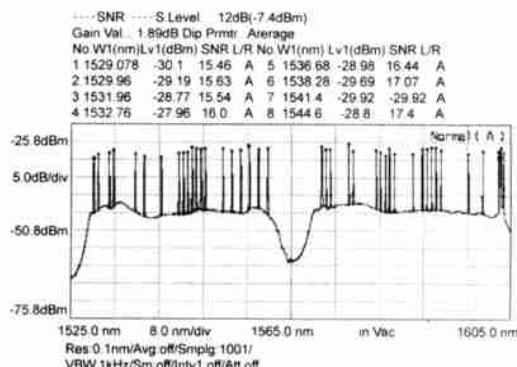


图5 传输3040km时的总的光谱

10 结束语

本文介绍了武汉邮电科学研究院研制 $160 \times 10\text{Gb/s}$ 波分复用系统的 3040km G. 652 光纤的无电中继传输, 波道速率 10.7Gb/s , 发送采用 CS RZ 码, 具有超强 FEC 功能, 光信噪比大于 15dB, 系统设备的功能和性能都达到国际业界同等水平。国内首次成功在实际 3040km 光纤上传输 C+L 波段 10Gb/s 信号, 首次将 C+L 宽带喇曼光纤放大器应用于 ULH 系统, 连续 24 小时无误码。这些有实际意义的研究结果为 WDM 高速超长距离系统的标准化和进一步商用奠定了基础。

参考文献:

- [1] ZENG Hui, YANG Zhu. The research of the CS RZ format's performance in high speed system[J]. STUDY ON OPTICAL COMMUNICATION, 2004, 2: 1-3.
曾晖, 杨铸. CS RZ 码在高速系统中传输性能的研究[J]. 光通信研究, 2004, (2): 1-3.
- [2] YANG Zhu, ZENG Hui, ZHANG Qiang, LIU Xianning, YAO Wei. 100Gb/s CS RZ 3040km optical transmission experiment without electronic regeneration[J]. STUDY ON OPTICAL COMMUNICATION,

2004, 1: 1-4.

杨铸, 曾晖, 张强, 刘贤炳, 姚伟. 10Gb/s CS RZ 码 3040km 无电再生光传输实验[J]. 光通信研究, 2004, (1): 1-4.

- [3] YANG Zhu, ZHANG Qiang, LIU Xianning, XI Sheng, ZENG Hui. Realization of $160 \times 10\text{Gb/s}$ 3040km optical transmission system without electronic regeneration in C+L band[J]. STUDY ON OPTICAL COMMUNICATION, 2004, 3: 1-9.

杨铸, 张强, 刘贤炳, 席申娥, 曾晖. $160 \times 10\text{Gb/s}$ C+L 波段 3040km 无电再生光传输系统[J]. 光通信研究, 2004, (3): 1-9.

作者简介:



杨 铸, 男, 1955 年出生于四川犍为, 教授级高工, 武汉邮电科学研究院副总工程师, 主要研究方向为超大容量 DWDM 光网络。E-mail: yanggz@wri.com.cn.

刘贤炳 男, 1969 年出生于湖北公安, 博士, 烽火通信公司高工, 主要研究方向为 DWDM 光网络的理论与技术。