

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240135.

光纤光缆技术

谭业欣,彭阳,汪俊奇,等.基于400 Gbit/s C+L系统的CL光纤传输性能的研究[J].光通信研究,2026(1):240135.

Tan Y X, Peng Y, Wang J Q, et al. Research on Transmission Performance of CL Optical Fiber based on 400 Gbit/s C+L System [J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240135.

# 基于400 Gbit/s C+L系统的CL光纤传输性能的研究

谭业欣<sup>1,2</sup>,彭阳<sup>1</sup>,汪俊奇<sup>1</sup>,陈玺<sup>3</sup>

(1.烽火通信科技股份有限公司网络产出线,武汉430205; 2.武汉邮电科学研究院,武汉430074; 3.武汉网锐检测技术有限公司,武汉430074)

**摘要:**【目的】在400 Gbit/s C+L系统中,受激拉曼散射效应(SRS)对传输信号的影响不可忽视,随着业务信号传输距离的增加,功率由短波向长波转移量随之累加。文章通过研究CL光纤的衰减系数和信号功率平坦度对系统末端光信噪比(OSNR)的影响,得到减小功率转移量的有效方案。【方法】衰减系数不同的A、B光纤在长度一样衰耗值不同和衰耗值相同长度不同的两种情况下得到功率谱结果并进行对比。【结果】当A、B光纤衰耗值不同时,光纤平均损耗小,末端OSNR更好;当A、B光纤衰耗值相同时,系统末端功率平坦度好,末端OSNR更好。【结论】在系统传输距离不变的情况下,减小光纤平均损耗可以提高OSNR;在系统衰耗不变的情况下,对末端功率调平,降低波道功率差。在1550/1625 nm衰减系数不变的情况下,C波段的衰减翘度小,系统传输性能更好。CL光纤衰减系数范围还能更精确。

**关键词:**CL光纤;光纤衰减系数;光信噪比;功率谱平坦度

**中图分类号:**TN929 **文献标志码:**A

## Research on Transmission Performance of CL Optical Fiber based on 400 Gbit/s C+L System

TAN Yexin<sup>1,2</sup>, PENG Yang<sup>1</sup>, WANG Junqi<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>

(1. Network Output Line, FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China; 2. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Wangrui Testing Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:**【Objective】In the 400 Gbit/s C+L system, the impact of Stimulated Raman Scattering(SRS) on transmission signals cannot be ignored. As transmission distance increases, the signal power transferred from short wavelengths to long wavelengths accumulates. By investigating the impacts of fiber attenuation coefficient and signal power flatness on the Optical Signal-to-Noise Ratio(OSNR) at the system terminal, this paper proposes an effective scheme for reducing the power transfer amount.【Methods】The power experimental results of optical fiber A and B with different attenuation coefficients are obtained and compared in two cases.【Results】When the attenuation values of fibers A and B are inconsistent, the smaller the average fiber-optic loss, the better the terminal-system OSNR. When the line loss is consistent, the flatter the power spectrum, the better the terminal-system OSNR.【Conclusion】When the system transmission distance remains unchanged, reducing the average fiber-optic loss can improve the OSNR. When the system attenuation remains unchanged, adjusting the terminal-system power flatness can reduce the power differences. Without affecting the attenuation coefficient of 1550/1625 nm, the attenuation curl of the C-band can be reduced, resulting in better system transmission performance.

**Key words:** CL optical fiber; fiber-optic attenuation coefficient; OSNR; power spectrum flatness

## 0 引言

随着第5代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)布局的深入进行,对传送网络的传输速率和传输性能需求也不断提高。当前,针对光传输系统性能提升的研究,一方面是研发新型光纤和放大器等产品;另一方面是对关键技术进行改进,如前向纠错(Forward Error

Correction, FEC)和波段扩展等。目前超低损耗光纤制备技术成熟,全球多家公司已实现超低损耗光纤的规模生产<sup>[1]</sup>,基于Super C Band长距离超低损耗光纤的掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)设计也有实现方案,系统容量及频谱效率有效提升<sup>[2]</sup>。技术改进上,FEC目前有提升增益性能的研究方向,而传输波段扩展的研究还处在技术不成熟阶段<sup>[3]</sup>,波段扩展到O、E和S波段

收稿日期:2024-06-24; 修回日期:2024-07-24; 纸质出版日期:2026-02-10

作者简介:谭业欣(1998-),女,湖北武汉人。硕士,主要研究方向为通信与信息系统。

通信作者:谭业欣,硕士。E-mail:763254351@qq.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

时,光纤损耗高,光器件性能明显降低,非线性效应对功率影响大<sup>[4]</sup>。除此之外,工程上混合组网可以根据光信噪比(Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR)代价对不同线路业务速率进行优化<sup>[5]</sup>。在600 Gbit/s传输系统中对单载波入纤功率和滤波带宽进行实验,得到最佳传输性能时的参数值<sup>[6]</sup>。

400 Gbit/s系统要满足80波的传输容量,需要扩展到C+L波段才能实现“距离不变,容量翻倍”<sup>[7]</sup>。在密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexer, DWDM)系统中,16进制正交振幅调制(Hexadecimal Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM)比正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)映射点更分散,16QAM传输性能更好;载波形式上QPSK抗噪声能力更强<sup>[8]</sup>,可编码频谱范围更大。同时,不同调制格式也影响系统最大传输容量和跨损<sup>[9]</sup>。本文系统采用16QAM码型,在C96+L96波段频谱,研究CL光纤在C+L系统的传输性能。

## 1 CL 光纤

2021年,亚太光纤光缆产业协会(Asian-Pacific Optical Fiber and Cable Industry Association, APC)技术委员会正式发布标准(3.0(2021)),该标准定义了一种衰减性能得到优化的在C+L波段最高可支持50 GHz,240波的波分复用(Wavelength Division Multiplexer, WDM)系统用的超大容量单模光纤,简称CL光纤。新增了光纤性能指标:光纤衰减系数翘度(Fiber Attenuation Coefficient Warping Degree, FAWD)和光纤衰减翘度差(Fiber Attenuation Warping Degree Difference, FAWDD)<sup>[10-11]</sup>。

光纤衰减系数随波长呈现U形状态时某一特定波长处的衰减系数与波长范围内最小衰减系数的差称之为FAWD。1520 nm波长的FAWD为 $\Delta\alpha_{1520}$ ,1625 nm波长的FAWD为 $\Delta\alpha_{1625}$ 。两个不同特定波长处的FAWD的算数差的绝对值称之为FAWDD,用 $\Delta\alpha$ 表示为<sup>[8,10]</sup>

$$\Delta\alpha = |\Delta\alpha_{1520} - \Delta\alpha_{1625}| \quad (1)$$

光纤衰减特性指标如表1所示,规定满足 $\Delta\alpha_{1520} < 0.020$ 、 $\Delta\alpha_{1625} < 0.020$ 和 $\Delta\alpha < 0.009$ 条件的光纤为CL光纤。 $\Delta\alpha$ 越小,C+L波段的衰减谱曲线越平缓,OSNR劣化的程度越小,采用CL光纤时达到的传输效果越好<sup>[10-12]</sup>。

表1 CL 光纤衰减特性指标

Table 1 CL fiber attenuation characteristics index

单位:dB/km

项目	技术指标		
	A级	B级	C级
1520 nm 衰减系数最大值	0.200		
1625 nm 衰减系数最大值	0.250		
$\Delta\alpha_{1520}$	$\leq 0.020$	$\leq 0.018$	$\leq 0.015$
$\Delta\alpha_{1625}$			
$\Delta\alpha$	$\leq 0.009$	$\leq 0.006$	$\leq 0.003$

## 2 400 Gbit/s C+L 传输系统

一般来说,业务信道的线路误码率(Bit Error Ratio, BER)能够反映系统传输信号的优劣,但是在C+L系统中为了均衡信道,会用假光(Dummy Light, DL)信号填充无真实业务波长的通道,噪声功率较大情况下,系统末端OSNR体现入纤功率过系统后的变化,系统架构不变时,OSNR对远距离传输系统功率变化更准确。

非线性 OSNR 可表示为

$$OSNR = \frac{P_{ch}}{P_{noise}} \quad (2)$$

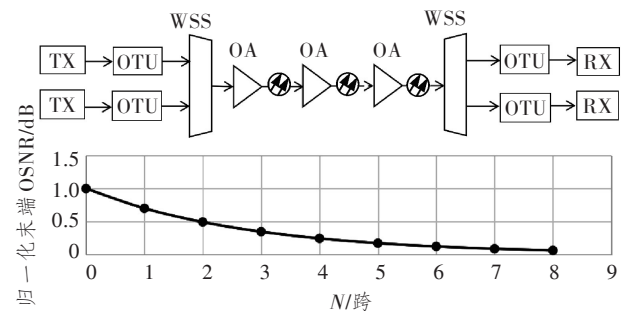
式中: $P_{ch}$ 为信号功率; $P_{noise}$ 为噪声功率。

在各波道功率接近,非线性效应近似时,线性 OSNR 可近似表示为

$$OSNR \approx 58 + P - L_{loss} - Nf - 10\lg N \quad (3)$$

式中: $P$ 为入纤功率(单位:mW); $L_{loss}$ 为跨段损耗; $Nf$ 为光放大器(OA)噪声系数; $N$ 为跨段数。

由上述公式可知,末端 OSNR 与系统的信号功率  $P_{ch}$  正相关,与跨段数  $N$  等参数负相关。系统归一化末端 OSNR 随  $N$  的变化趋势如图1所示。 $N$ 为传输的光纤数量,单跨长100 km。光信号在系统中传输距离越远,末端 OSNR 越小。



注:WSS为波长选择开关;TX/RX分别为信号发送/接收端;OTU为光传送单元。

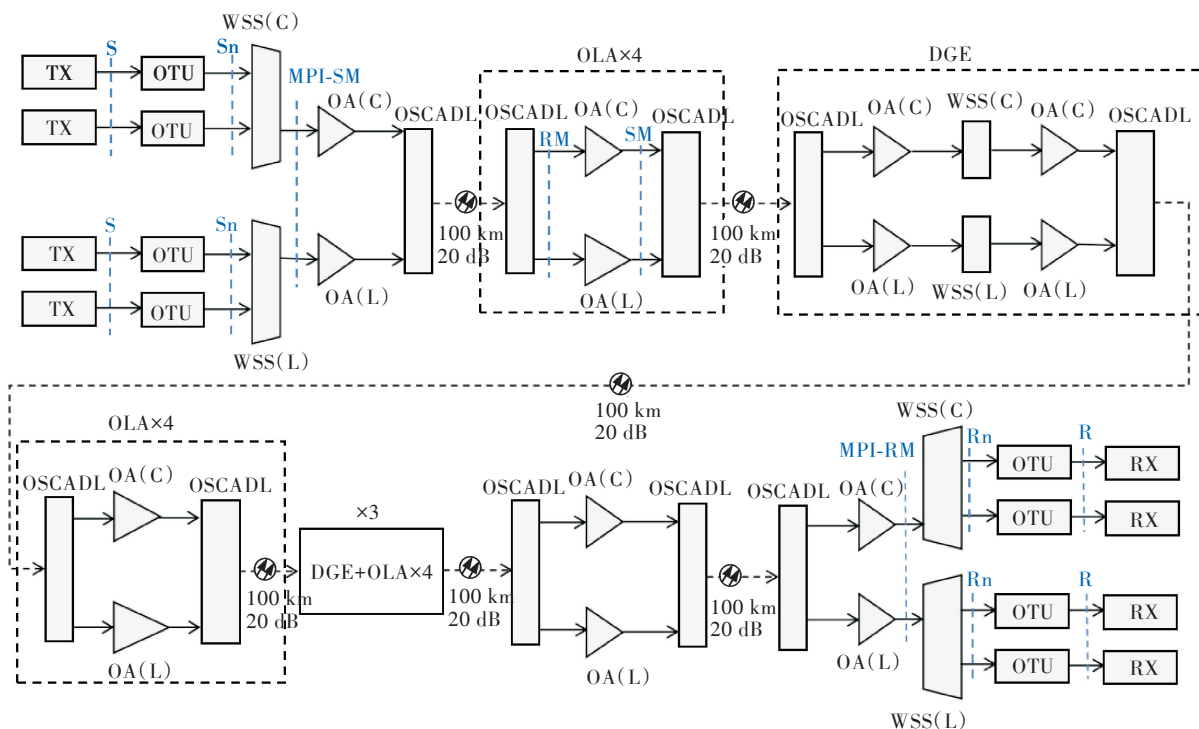
图1 光传输系统中 OSNR 趋势图

Figure 1 The trend chart of OSNR value in optical transmission system

在 DWDM 系统中,存在 OA 固有的增益不平坦性以及受激拉曼散射效应(Stimulated Raman Scattering, SRS)功率转移非线性效应,C 波段短波长能量向 L 波段长波长迁移,光信号经过一段距离传输后,各波长通道之间的光功率差异增大,造成通道的接收性能劣化。

### 3 实验与结果分析

实验拓扑图如图 2 所示,OA 和光线路放大器(Optical Line Amplifier, OLA)用于补偿功率差。每 4 个信号放大站点设置 1 个动态增益均衡器(Dynamic Gain Equalizer, DGE)保证功率平坦度。系统各跨段为纯光纤,长 100 km,跨段损耗 20 dB,共 20 跨。在 MPI-RM 处测末端 OSNR。



注:OSCADL为支持C+L波段合分波器;S/R为TX发送/RX接收信号节点;Sn/Rn为OTU节点发送/接收信号节点;MPI-SM/MPI-RM为过系统的信号输入/输出节点。WSS(L)、WSS(C)、OA(L)和OA(C)分别为L、C波段的WSS和OA器件。

图 2 C+L 传输系统实验拓扑图

Figure 2 The experimental topology map of C+L transmission system

系统业务侧 OTU 业务波配置 C 波段 1 529. 16、1 547. 72、1 567. 13 nm 和 L 波段 1 570. 01、1 589. 15、1 610. 06 nm,其他通道用填充波。

#### 3.1 系统设计

实验系统拓扑如图 2 所示,采用 G. 652D 光纤。系统 1 中,A、B 光纤样品在系统中传输距离相同,跨段物理损耗不同,系统 2 中,A、B 光纤样品在系统中传输跨段物理损耗相同,距离不同。当系统为 20 跨,跨段损耗为 20 dB 时,测量 C 波段入纤功率=22. 7 dB,L 波段入纤功率=21. 2 dB,OSCADL 损耗可测量得出,SRS 转移量由跨段传输后功率测量值与入纤功率、器件插损相减得到,并计算 C 波段实际损耗=25 dB,L 波段实际损耗=21. 3 dB。查表得 C 波段 OA 噪声系数  $N_f=4. 3$  dB,L 波段  $N_f=6. 6$  dB,由公式可得 C 波段的  $OSNR=24. 3$  dB,

L 波段的  $OSNR=24. 2$  dB。

#### 3.2 系统调测

功率谱调平步骤如图 3 所示,在初步调整放大器放大斜率后,配置滤波通道衰减,再依据收端光谱,积分计算各波道功率,反推收端衰减值,重下配置,最终实现收端功率调平。

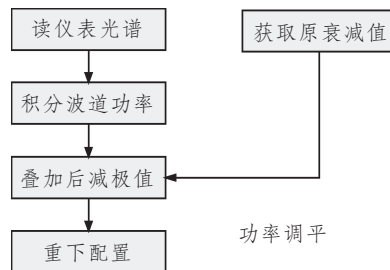


图 3 功率调平步骤图

Figure 3 The flow chart of power adjustment  
通常在在进行末端 OSNR 调平前会先评估一轮

末端功率情况,调节功率到大致水平齐平。末端 OSNR 调平步骤如图 4 所示。

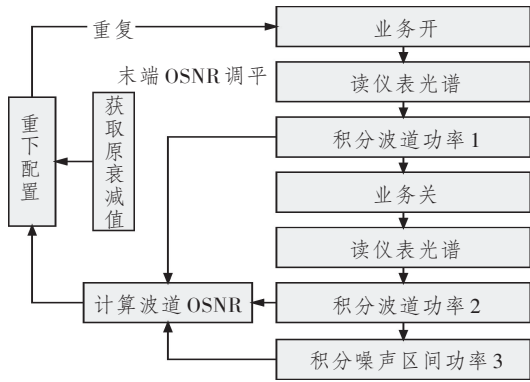


图 4 末端 OSNR 调平步骤图

Figure 4 The flow chart of terminal OSNR adjustment

### 3.3 实验结果

#### 3.3.1 系统 1:跨段物理损耗不一致

测得 A、B 两种光纤衰减系数值如表 2 所示,表中,CUR 为当前数值;MAX 为最大值;MIN 为最小值。3 种数值体现了光纤衰减系数的误差度。

A、B 光纤损耗如图 5 所示,无功率转移的光纤损耗定义为物理损耗,有功率转移的光纤损耗定义为实际损耗。由于 SRS 效应,短波长功率转移到长波长上,C 波段光纤损耗实际损耗大于物理损耗,L 波段光纤损耗实际损耗小于物理损耗。C 波段线路平均损耗 A 样品<B 样品,L 波段 A、B 光纤损耗无明显差异,OA 固定增益。

表 2 A、B 样品光纤衰减系数值

Table 2 The fiber attenuation coefficient of sample A and B

样品	长度/ km	1 520 nm		1 625 nm		$\Delta\alpha_{1520}$			$\Delta\alpha_{1625}$			$\Delta\alpha$		
		衰减系数/ dB/km	衰减系数/ dB/km	CUR	MIN	MAX	CUR	MIN	MAX	CUR	MIN	MAX	CUR	MIN
A	50	0.183 0	0.195 9	0.010 6	0.013 4	0.012 1	0.011 9	0.014 6	0.013 2	0	0.002 7	0.001 1		
B	50	0.189 7	0.211 1	0.005 0	0.010 0	0.0076	0.018 0	0.030 0	0.022 6	0.01	0.025 0	0.014 7		

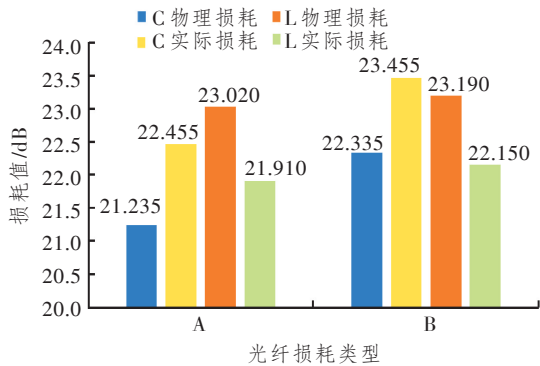
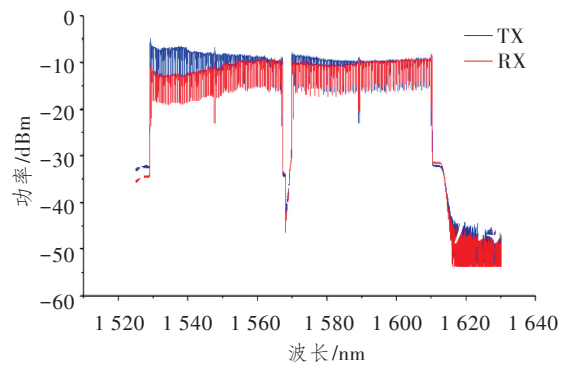


图 5 A、B 光纤 CL 波段光纤损耗直方图

Figure 5 The bar chart of A-fiber-optic loss value and B-fiber-optic loss value at C-band to L-band

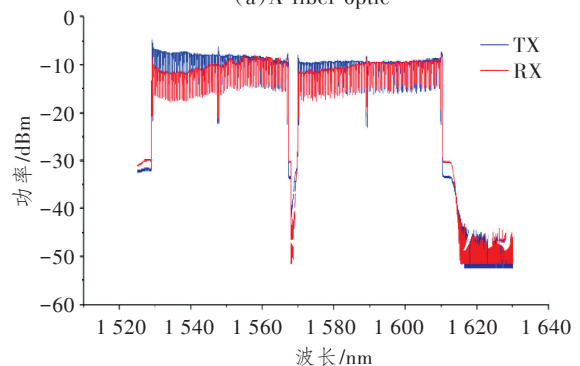
系统 1 A、B 光纤功率谱结果如图 6 所示,在保证系统传输性能最好,即末端 OSNR 最佳情况下,A、B 光纤系统功率调平前后对应的 TX 谱会有不同。不同光纤物理损耗不同, TX 谱相同会导致通过系统后 RX 谱功率较差。

末端 OSNR 归一化结果如图 7 所示,A 样品系统末端 OSNR 值较大,传输性能更好。由图 5 可知,光纤损耗 A 样品线路平均损耗更小,由图 6 可知,A、B 光纤功率谱转移情况无明显差异。可以得出结论,在系统跨段损耗不一致的情况下,光纤物理损耗对系统末端 OSNR 起主导作用。



(a) A 光纤

(a) A-fiber-optic



(b) B 光纤

(b) B-fiber-optic

图 6 系统 1 功率结果图

Figure 6 The chart of power value in system 1

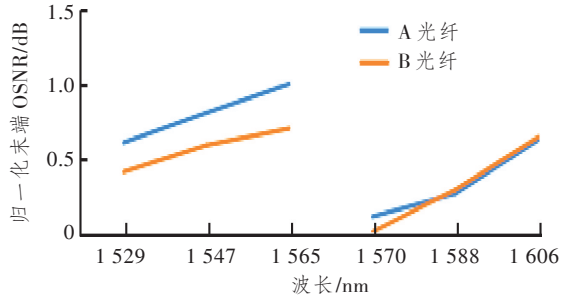


图 7 系统一末端 OSNR 归一化结果图

Figure 7 The normalized result of terminal-system OSNR value in system 1

### 3.3.2 系统 2: 跨段物理损耗一致, 均为 20 dB

系统 2 功率谱结果如图 8 所示, 物理损耗一致的情况下 TX 谱相同, 从 RX 谱看出, B 样品 SRS 功率转移量比 A 样品少, 功率平坦度更好。

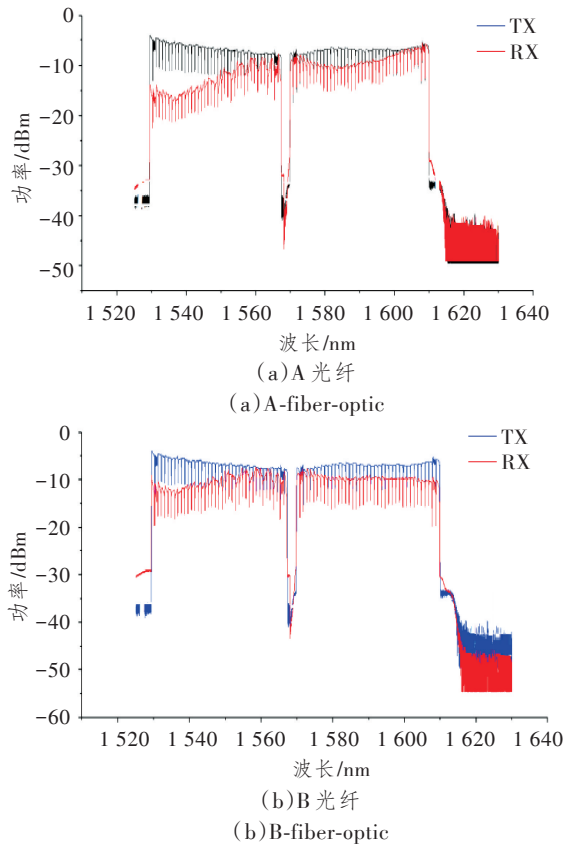


图 8 系统 2 功率结果图

Figure 8 The chart of power value in system 2

末端 OSNR 归一化结果如图 9 所示, B 样品系统末端 OSNR 在 C 波段上趋势更平稳, 此时系统末端功率平坦度对系统末端 OSNR 起主导作用。

系统 2 测得归一化光纤衰减趋势和归一化功率趋势曲线如图 10 所示。当波长越大时, 光纤衰减系数越小、功率增加, 但当波长到了 1580 nm 附近时, 波长再增加, 衰减系数增大、功率减小。

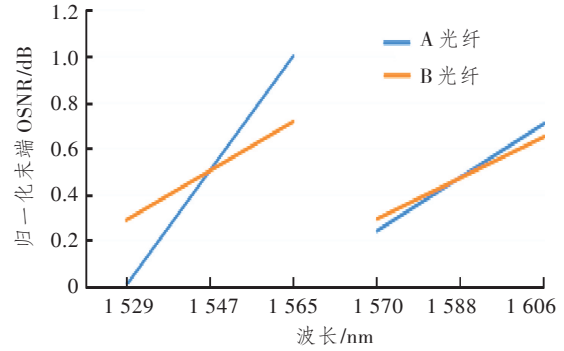


图 9 系统 2 末端 OSNR 归一化结果图

Figure 9 The normalized result of terminal-system OSNR value in system 2

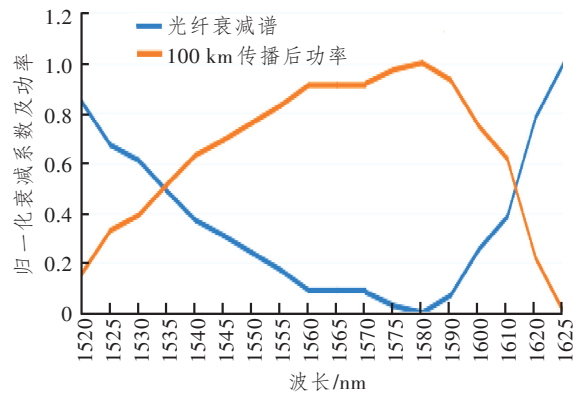


图 10 归一化光纤衰减和归一化功率对比图

Figure 10 The comparison chart of normalized fiber attenuation value and normalized power value

为了对比 A、B 样品衰减系数的变化, 虚线 A 往上平移得到曲线 A<sub>1</sub>, 处理后的衰减曲线对比图如图 11 所示, 曲线 B 相较曲线 A<sub>1</sub> 在 C 波段的 FAWD 低, L 波段的 FAWD 高。对比平坦度, 在 C 波段(A>B)B 曲线更好, 而 L 波段(B>A)A 曲线更好, 通过 C 波段上光纤衰减系数减小优化系统末端的 OSNR。

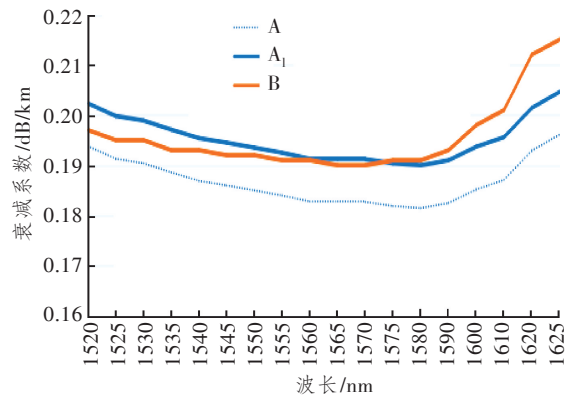


图 11 A、B 光纤衰减曲线对比图

Figure 11 The comparison chart of A-fiber-optic and B-fiber-optic attenuation

## 4 结束语

A、B 光纤在 C+L 系统中传输,测得线路平均损耗在 C 波段上 A 光纤<B 光纤,L 波段上无明显差异。在系统跨段物理损耗不一致情况下,保证最佳 OSNR,A 光纤的平均光纤损耗小,OSNR 趋势更优;在系统跨段物理损耗一致情况下,保证 TX 功率谱一致,B 光纤的 RX 功率谱平坦度更好,OSNR 趋势更优。

由单跨物理损耗一致情况下的实验结果得出系统末端 OSNR 最佳调整方案:①减小光纤衰减系数,物理损耗减小,补偿 SRS 功率转移量;②在 1 520/1 625 nm 衰减系数不变的情况下,减少光纤在 C 波段范围的衰减系数翘度;③抬高 C 波段短波长的功率,转移量增加,与传输后的功率谱趋势相反,预均衡功率。

从 A、B 光纤衰减系数实测结果来看,理想的 CL 光纤定义的  $\Delta\alpha_{1520} < 0.020$ ,  $\Delta\alpha_{1625} < 0.020$ ,  $\Delta\alpha < 0.009$  可以更精确。

### 参考文献:

- [1] 李泳成,杨昊,郭宁宁,等. 超低损耗光纤技术的研究现状[J]. 光通信研究, 2021(6): 45-51.  
Li Y C, Yang H, Guo N N, et al. A Survey on Ultra-Low Loss Fiber Technology [J]. Study on Optical Communications, 2021(6): 45-51.
- [2] 孟玉锦,程雯. 基于Super C Band的可调增益掺铒光纤放大器设计[J]. 光通信研究, 2023(5): 73-78.  
Meng Y J, Cheng W. Design of Tunable Gain Erbium-Doped Fiber Amplifier based on Super C Band [J]. Study on Optical Communications, 2023(5): 73-78.
- [3] 汤瑞,吴冰冰,赵文玉,等. 单载波800 Gbit/s光传输关键技术及标准化进展[J]. 光通信研究, 2022(3): 17-23.  
Tang R, Wu B B, Zhao W Y, et al. Research on Key Technologies of Single Carrier 800 Gbit/s Optical Transmission System [J]. Study on Optical Communications, 2022(3): 17-23.
- [4] 张旭,罗鸣,杨超,等. 多波段大容量光传输系统研究[J]. 光通信研究, 2022(5): 1-6.  
Zhang X, Luo M, Yang C, et al. Research of Large Capacity Optical Transmission System based on S/C/L Band [J]. Study on Optical Communications, 2022(5): 1-6.
- [5] 陈贇昌,梅亮,贺鸣文,等. 基于DWDM的超100 Gbit/s混合组网分析[J]. 光通信研究, 2024(1): 230137.  
Chen Y C, Mei L, He M W, et al. Analysis of DWDM-based beyond 100 Gbit/s Hybrid Networking [J]. Study on Optical Communications, 2024(1): 230137.
- [6] 曹亮,范奇,刘婷. 600 Gbit/s速率传输系统的实验研究[J]. 光通信研究, 2024(1): 220041.  
Cao L, Fan Q, Liu T. The Experiment Research on 600 Gbit/s Communication System [J]. Study on Optical Communications, 2024(1): 220041.
- [7] 李俊杰,杨玉森. 400 Gbit/s WDM传输技术及标准化进程[J]. 邮电设计技术, 2018(6): 57-61.  
Li J J, Yang Y S. Introduction to Technology and Standardization of 400 Gbit/s WDM System [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(6): 57-61.
- [8] 戈文德·P·阿格拉瓦尔. 光纤通信系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.  
Govind P A. Fiber-Optic Communication Systems [M]. Beijing, China: Electronic Industry Press, 2020.
- [9] 张洪,甘文凤. 不同调制格式对400 Gb/s通信系统传输容量和距离的影响[J]. 光通信技术, 2021, 45(2): 32.  
Zhang H, Gan W F. Influence of Different Modulation Formats on Transmission Capacity and Distance of 400 Gb/s Communication System [J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(2): 32.
- [10] 熊涛,祁庆庆,刘骋. 最优截止波长下的DWDM系统用CL光纤[J]. 现代传输, 2022(3): 39-41.  
Xiong T, Qi Q Q, Liu C. CL Fiber for DWDM System at Optimal Cutoff Wavelength [J]. Modern Transmission, 2022(3): 39-41.
- [11] APC FAT-0001 V1.0-2021, C+L WDM 系统用超大容量单模光纤 [S].  
APC FAT-0001 V1.0-2021, A Super High Capacity Single-Mode Optical Fiber for C+L WDM System [S].
- [12] 毛谦. 全球光传输网承受巨大压力 CL新型光纤助力容量提升 [EB/OL]. (2022-05-31) [2024-06-24]. <https://www.c114.com.cn/topic/6103/a1197814.html>.  
Mao Q. Global Optical Transmission Network under Tremendous Pressure, New Optical Fiber Assists in Enhancing the Transmission Capacity of Optical Networks [EB/OL]. (2022-05-31) [2024-06-24]. <https://www.c114.com.cn/topic/6103/a1197814.html>.