

光学学报

多芯光纤通信海缆的能效理论及系统参数优化

孙林¹, 刘宁^{1*}, 蔡轶¹, 张俊威², 李朝晖³, 吕超², 沈纲祥¹

¹苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006;

²香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港 999077;

³中山大学电子与信息工程学院, 广东 广州 510275

摘要 针对跨海光通信系统, 海岸两侧供电架构导致的能效问题是限制其容量的主要因素。多根单模光纤(M-SMF)复用是目前阶段提高通信海缆容量的主要解决方案。然而, 海缆中可容纳的光纤数量往往受限于其机械特性和下缆难度, 可容纳光纤数量目前通常限制在 32 以下。因此, 高复用密度的空分复用技术有望在海缆通信领域中展现其优势。对基于多芯光纤(MCF)海缆的能效公式进行了理论推导, 对比了 MCF 海缆与 M-SMF 海缆的能效特性, 并分析多芯耦合器插损、芯间串扰等边际参数对系统总体能效的影响。结果证明: 采用 4 芯光纤在跨大西洋海缆和跨太平洋海缆中的最优光纤数目分别为 86 和 14; 采用 7 芯光纤在跨大西洋海缆和跨太平洋海缆中的最优光纤数目分别为 50 和 8。在海缆最大容纳光纤数目(32)情况下: 4 芯光纤在跨大西洋场景和跨太平洋场景中相比 M-SMF 海缆可以提升能效至 2.50 倍和 1.13 倍; 7 芯光纤在跨大西洋场景和跨太平洋场景中相比 M-SMF 海缆可以提升能效至 3.20 倍和 1.13 倍。

关键词 光通信; 光纤特征; 光纤表征; 光复用

中图分类号 TN911.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1506005

Power Efficiency Theory and System Parameter Optimization for Multi-Core Fiber-Based Submarine Cables

Sun Lin¹, Liu Ning^{1*}, Cai Yi¹, Zhang Junwei², Li Zhaohui³, Lü Chao²,
Shen Gangxiang¹

¹School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

²Department of Electrical and Information Engineering, The Hongkong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

³School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China

Abstract For the cross-sea optical communication system, the power efficiency problem caused by the power supply structure between shores is the main factor that limits its capacity. Multiple single-mode fiber (M-SMF) multiplexing is the main solution to improve the capacity of communication submarine cables at present. However, the maximum deployed fiber count in a submarine cable is usually limited up to 32 due to the considerations of cable mechanics and deployment engineering. As a consequence, high-density spatial division multiplexing is expected to show its advantages in the field of submarine cable communication. The power efficiency formula based on multi-core fiber (MCF) submarine cable is deduced theoretically, the power efficiency characteristics of MCF submarine cable and M-SMF submarine cable are compared, and the effects of marginal parameters such as insertion loss of multi-core coupler and inter-core crosstalk on the overall power efficiency of the system are analyzed. The results show that the optimal number of trans-Atlantic 4-core fiber and trans-Pacific 4-core fiber is 86 and 14 respectively, and the optimal number of trans-Atlantic 7-core fiber and trans-Pacific 7-core fiber is 50 and 8 respectively. When fiber count is limited to 32, the power efficiency of 4-core fiber can be improved by 2.50 times and 1.13 times compared with M-SMF submarine cable in trans-Atlantic and trans-Pacific scenarios, and that of 7-core fiber can be improved by 3.20 times and 1.13 times compared with M-SMF submarine cable

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(62035018, 62105273)

通信作者: *gordonliu@suda.edu.cn

in trans-Atlantic and trans-Pacific scenarios.

Key words optical communications; fiber properties; fiber characterization; optical multiplexing

1 引言

海缆通信是各大洲间通信互连的关键链路,其容量亟需大规模提升以满足日益增长的数据需求。目前,商用海缆仍是基于多根单模光纤(M-SMF)进行数据传输的。然而,传统单模光纤受限于光纤非线性的影响,即便采用波分复用、光偏振复用和先进调制技术,也难以突破长距离 100 Tb/s 的容量。空分复用技术采用空间分集方式,使得容量与复用数目近似线性增长^[1-3],并且使得单位纤芯面积下的功率大幅降低,进而抑制了光学非线性效应,因此有望革新包括海缆通信在内的光通信产业。针对海缆通信场景,考虑到光纤制备、信号中继和下缆难度等实际问题,多芯光纤(MCF)复用相比模分复用更为实用。

由于海缆两岸供电的限制,故如何在有限供电条件下实现最大容量是海缆通信的最关键问题之一。解决该问题有两种独立思路:1)实现更高效的中继放大;2)以最大容量为目标的边际参数最优化。针对高效率中继放大的技术路线,采用包层泵浦的集成放大器并结合掺杂技术是一种可能方案。目前,具有 11.5% 电光效率的光放大器技术已被报道于第 45 届欧洲光纤通信展览会中^[4]。可以看出,针对高电光效率的中继放大仍具有较大研究空间,并对海缆通信具有非常重要的实际意义。另一方面,庞大的海缆系统中具有多个影响容量性能的参数,如单跨长度、调制格式、信噪比和光纤数目等。建立以最大容量为目标的海缆系统多维优化模型对海缆系统实际部署具有重要意义。Bolshtyansky 等^[5-7]针对 M-SMF 海缆已经开展了一些多参数优化的理论研究。由于 MCF 复用相比 M-SMF 具有更多的复用线路,故在海缆光纤数目限制下,直观上 MCF 海缆相比 M-SMF 海缆具有更大的容量和更优的能效性能。

本文针对 MCF 海缆的能效理论展开了研究,重点讨论了 MCF 海缆系统中单跨长度、调制格式、信噪比和纤芯数目等参数的优化策略。基于目前主流的 4 芯光纤、7 芯光纤和耦合器参数,对比 MCF 海缆和 M-SMF 海缆的能效特性。最后,重点分析了多芯耦合器插损、放大器噪声指数等重点边际参数对系统能效的影响。

2 基本原理

中继放大是海缆系统中的一个重要部分。在实际情况下,多芯海缆系统中的中继器产生的光功率无法完全转化为信号功率,因为其中一部分转化成了放大自发辐射(ASE)噪声。因此,信号功率随着中继放大次数的增加是在不断减少的,这种效应称作 signal droop^[3]。除了信号外,前一次中继器中引入的 ASE 噪声也会随着中继放大次数的增加而减小,所以系统总

ASE 噪声不是每次中继放大引入的噪声功率的线性叠加,这种效应称作 ASE droop。定义通信光缆总长度为 L 、双向空分复用数目为 M 、放大器个数为 N 、单跨长度为 $l=L/(N+1)$ 。同时,假设两端供电电压为 V 、光放大器(OA)电光效率(放大器输出光功率与输入电功率的比值)为 η_{OA} 、供电电缆总阻抗为 R 。若光功率全部转化为信号功率,则海缆可获得的最大光功率为

$$P_{\text{MAX}} = \eta_{\text{OA}} \frac{V^2}{4RL}, \quad (1)$$

其中,等式右侧分母项中的 4 是供电电缆阻抗消耗导致的。因此,输出端单个空分线路光信号的最大功率谱密度可以表示为

$$M_{\text{PSD, signal}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{MBN}, \quad (2)$$

式中: B 为系统有效带宽。根据香农容量公式,存在 signal droop 效应下的海缆通信系统总容量 C 为

$$C = M \cdot B \cdot \text{lb} \frac{M_{\text{PSD, signal}}}{N_0}, \quad (3)$$

式中: N_0 为单个空分线路输出端噪声的功率谱密度,包括放大器 ASE 噪声功率谱密度和光纤 Kerr 非线性噪声(NLN)功率谱密度,即

$$N_0 = N \cdot hf(F \cdot G - 1) + \chi \text{lb} B \cdot M_{\text{PSD, signal}}^2, \quad (4)$$

式中:右侧第一项为 ASE 噪声功率谱密度,其中 hf 为单位光子能量, h 为普朗克常量, f 为光频率; F 为线性坐标下的放大器噪声指数; G 为线性坐标下的放大倍数,与单跨链路的损耗相消; χ 为光纤非线性系数。结合式(3)和式(4),可以获得多芯海缆通信总容量 C (双偏振),其表达式为

$$C = MB \text{lb} \left[\frac{M_{\text{PSD, signal}}}{N \cdot hf(F \cdot G - 1) + \chi \text{lb} B \cdot M_{\text{PSD, signal}}^2} \right], \quad (5)$$

由于式(5)中 M 为双向的空分线路数目,故计算海缆的双偏容量时无需引入额外的 2 倍因子。当芯间串扰在接收端无多人多出(MIMO)信号处理时,会对 MCF 中传输的信号造成干扰。其中,串扰引起的噪声方差 σ_{XT}^2 的表达式为

$$\sigma_{\text{XT}}^2 = M_{\text{PSD, signal}} \frac{\mu_{\text{X}}}{4}, \quad (6)$$

式中: μ_{X} 为串扰均值。

3 分析与讨论

3.1 多芯海缆系统参数优化理论推导

针对现阶段常用的 4 芯^[8]和 7 芯^[9]光纤,为获取其应用于海缆场景时的最优纤芯数目和单跨长度,需要进行一些定义,即定义双向总光功率(所有跨段的所有空分线路)为 P_{tot} ,纤芯数目为 M_{core} ,双向光纤数目为 M_{fiber} 。单个空分线路的噪声包括 ASE 噪声、非线性噪

声和串扰。此时,系统的容量可表示为

$$C = M_{\text{fiber}} \cdot M_{\text{core}} \cdot B \cdot \text{lb} \left(\frac{P_{\text{tot}}}{N \cdot M_{\text{fiber}} \cdot M_{\text{core}} \cdot P_{\text{noise}}} \right). \quad (7)$$

因此,海缆能效 M_{PE} 可以表示为

$$M_{\text{PE}} = \frac{M_{\text{fiber}} \cdot M_{\text{core}} \cdot B \cdot \text{lb} \left[P_{\text{tot}} / (N \cdot M_{\text{fiber}} \cdot M_{\text{core}} \cdot P_{\text{noise}}) \right]}{P_{\text{tot}}}. \quad (8)$$

由于供电功率 P_{tot} 固定,因此最优能效在最大容量 C 获得的同时取得。根据参考文献[6]的仿真结果,能效最大的海缆系统中光纤非线性可以忽略,这是因为空间分集导致光纤中功率密度未达到非线性阈值。因为功率受限的海缆通信系统中非线性噪声影响较小,并暂时忽略串扰的影响,所以将式(4)代入式(7)中,可以获得

$$C = M_{\text{fiber}} M_{\text{core}} B \cdot \text{lb} \left\{ \frac{P_{\text{tot}}}{N^2 M_{\text{fiber}} M_{\text{core}} \exp[\alpha l / (N + 1)] F h \nu B} \right\}, \quad (9)$$

式中: α 为光纤损耗系数; ν 为光频率。将 M 当成连续值对待,显然 $C(M)$ 函数是凸函数,其最大值在导数为 0 处取得。 M 最优解的获得需要知道式(9)中的其他

参量,即取决于系统设计和硬件限制的带宽 B 和噪声指数 F ,因此需要先确定最优单跨长度 l 。此外, M 的最优解与中继放大器个数 N 相关。单跨长度最直接的影响也是唯一影响的是式(8)中的噪声项,因此最优 N 取得的充要条件是噪声最小。忽略非线性噪声影响(因为在功率受限的海缆系统中非线性噪声相比 ASE 噪声要小很多)^[6],由式(4)可以进一步推导得到

$$P_{\text{noise}} = \frac{L}{l} (e^{\alpha l} F - 1) F h \nu B. \quad (10)$$

对 $N \cdot P_{\text{noise}}$ 求导,可以获得最优单跨长度 $(2/\alpha)$,可以看出,最优单跨长度只与光纤损耗系数具有相关性。优化单跨长度为 $2/\alpha$ 后,式(9)可以简化为

$$C = M_{\text{fiber}} \cdot M_{\text{core}} \cdot B \cdot \text{lb} \left(\frac{P_{\text{tot}}}{N^2 M_{\text{fiber}} M_{\text{core}} e^2 F h \nu B} \right), \quad (11)$$

由于功率固定,故最优能效在最大容量处获得。对式(11)求导,可获得多芯海缆最优光纤数目,即 $M_{\text{fiber, best}} = 4P_{\text{tot}} / (e^3 F h \nu B L^2 \alpha^2 M_{\text{core}})$ 。

3.2 最优光纤数目下多芯海缆能效与 SMF 海缆能效对比

为对比多芯海缆与 SMF 海缆的能效,对跨大西洋和跨太平洋场景进行分析,对应长度分别为 6000 km 和 11000 km。对应的系统参数如表 1 所示。

表 1 跨大西洋和跨太平洋海缆主要参数

Table 1 Parameters for trans-Atlantic and trans-Pacific submarine cables

Trans-Atlantic submarine cable length /km	Trans-Pacific submarine cable length /km	Supplying voltage /kV	Overall electro-optical efficiency of repeater /%	OA's noise figure /dB	Nonlinearity parameter /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)
6000	11000	15	1.5	5	0.81×10^{-3}

基于 3.1 节中推导的多芯海缆优化理论:4 芯光纤在跨大西洋和跨太平洋海缆中的最优光纤数目(双向)分别为 86 和 14;7 芯光纤在跨大西洋和跨太平洋海缆中的最优光纤数目(双向)分别为 50 和 8。值得注意的是,海缆的可容纳纤芯数目有限,这是出于海缆应力和下缆难易程度的考虑。因此,当采用 4 芯光纤部署海缆时,针对跨大西洋和跨太平洋场景的最佳光纤数目

分别为 32 和 14;当采用 7 芯光纤部署海缆时,针对跨大西洋和跨太平洋场景的最佳光纤数目分别为 32 和 8。然而,采用 SMF 部署海缆时的最佳光纤数目已经被证明是 32^[5]。

基于上述光纤数目和表 1 中的系统参数设置,6000 km 和 11000 km 传输距离下的多芯海缆和 SMF 海缆容量对比如表 2 所示。

表 2 多芯海缆与 SMF 海缆容量对比

Table 2 Capacity comparison between MCF and SMF based submarine cables

unit: $\text{Tb} \cdot \text{s}^{-1}$

Experiment	SMF submarine cable	4-core MCF submarine cable	7-core MCF submarine cable
Trans-Atlantic experiment	630.03	1592.90	2014.33
Trans-Pacific experiment	310.20	350.37	350.37

由表 2 可以看出,多芯海缆相比 SMF 海缆具有更大的容量,且容量的提升在较短距离(跨大西洋)的场景中表现得更为明显。此外,由于采用 4 芯光纤和 7 芯光纤的 11000 km 海缆计算得到的最佳空分线路数目一致,故得到的容量也一致(350.37 Tb/s)。6000 km 和 11000 km 传输距离下的多芯海缆和 SMF 海缆的能效对比如表 3 所示。

由表 3 可以看出,多芯海缆相比 SMF 海缆具有更高的能效。特别是,对于较短海缆(6000 km)传输的

情况,采用 4 芯光纤和 7 芯光纤相比 SMF 海缆可以将能效提高到 2.50 倍和 3.20 倍。在 11000 km 海缆场景中,采用 4 芯光纤和 7 芯光纤相比 SMF 海缆可以将能效提高到 1.13 倍。

3.3 多芯海缆主要参数的边际影响结果

多芯海缆虽然存在明显的容量和能效优势,但是目前 MCF 和匹配器件的工艺仍处于有待完善的阶段。下面将分析在现阶段 MCF 链路的两种中继方式中多芯工艺水平对海缆能效的影响,两种中继方式分别为

表 3 多芯海缆与 SMF 海缆能效对比

Table 3 Power efficiency comparison between MCF and SMF based submarine cables

unit: bit·nJ⁻¹

Experiment	SMF submarine cable	4-core MCF submarine cable	7-core MCF submarine cable
Trans-Atlantic experiment	67.20	169.91	214.86
Trans-Pacific experiment	60.66	68.51	68.51

分离放大^[10]和包层泵浦集成放大^[11]。包层泵浦集成放大相比分离放大的最大优势便是中继器中不需要利用多芯耦合器进行放大,因此链路插损可以维持在较低水平。此外,多芯集成 OA 由于需要进行包层泵浦,故目前放大器效率和噪声指数是其瓶颈,进而需要进一步分析多芯包层泵浦放大器的噪声指数和放大器的电光(EO)效率对海缆容量的影响。

3.3.1 采用分离放大中继器的海缆中多芯耦合器插损的变化

采用分离放大中继器的多芯海缆的一个主要问题是每个中继器内均需要一对扇入扇出(FIFO)耦合器。FIFO 耦合器引入的插损将增加链路的功率损耗,导致 signal droop 效应增强,降低链路信噪比。此外,在中继器中多芯光纤熔接过程中也会引入熔接损耗,这

部分损耗可以综合考虑为 FIFO 损耗。下面针对第 3.2 节的参数设置,分析多芯耦合器插损对多芯海缆性能的影响。图 1(a)为不同 FIFO 插损条件下 4 芯海缆与 SMF 海缆的相对能效,图 1(b)为 7 芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。

从图 1 中可以看出:6000 km 海缆场景中 FIFO 插损容忍度很高。具体地,当采用 4 芯海缆且 FIFO 插损在 1.5 dB 以下时,海缆可以提供 2 倍的能效提升。当采用 7 芯海缆且 FIFO 插损低于 2.0 dB 时,海缆可以提供超过 2 倍的能效提升。11000 km 传输场景中 FIFO 插损要求较高,当 FIFO 插损大于 0.5 dB 时,多芯海缆相比 SMF 海缆无能效增益,这是因为该距离场景下 signal droop 效率在较小复用线路数目下发生,无法体现多芯空间分集的优势。

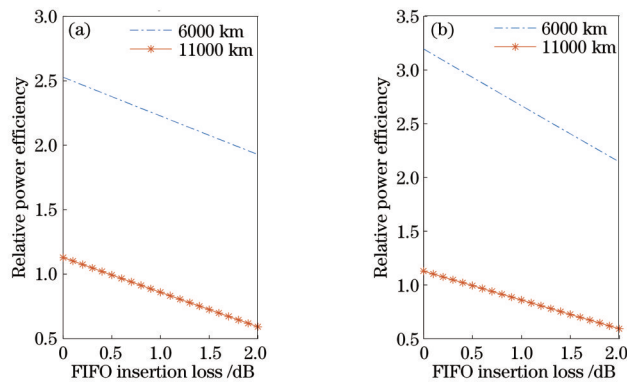


图 1 不同 FIFO 插损条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。(a) 4 芯海缆;(b) 7 芯海缆

Fig. 1 Relative power efficiency of MCF-based submarine cable to SMF submarine cable under different FIFO insertion losses. (a) 4-core submarine cable; (b) 7-core submarine cable

3.3.2 采用多芯集成光放大器中继器的海缆中放大器参数的变化

多芯集成 OA 是近年来的研究热点,这是因为包层泵浦放大器的耦合损耗较低,能保证链路信噪比。另外,多芯 OA 采用多模泵浦源,其泵浦光产生效率相比单模掺铒光纤放大器更高。本节主要分析多芯集成 OA 的噪声指数(NF)和总电光效率 η_{OA} 对多芯海缆性能的影响。

图 2 为不同放大器 NF 条件下的多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效,其中图 2(a)为 4 芯海缆情况,图 2(b)为 7 芯海缆情况。可以看出:在 6000 km 海缆场景中,放大器 NF 插损容忍度很高,采用 4 芯海缆,放大器 NF 在 6.5 dB 以下时海缆均可提供 2 倍的能效提升,采用 7 芯海缆,放大器 NF 在 7.0 dB 以下时海缆可以提供超过 2 倍的能效提升;在 11000 km 传输场景中,放大器 NF 要求较高。

图 3 为不同放大效率 η_{OA} 条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。当采用 4 芯海缆时,6000 km 距离下存在最优的电光转换效率,这是因为海缆可容纳光纤数目的限制为 32,此时较大光功率下采用 4 芯海缆存在非线性瓶颈。然而,在 11000 km 距离下,由于中继器数目明显增多,故对应光纤功率较 6000 km 传输情况较小。因此,11000 km 海缆下采用较高电光效率的放大器可以获得更优的能效。当采用 7 芯海缆时,使用具有更高电光效率的 OA 可以获得更优的海缆性能。若 OA 电光效率达到 10%,则采用 7 芯海缆可以获得较 SMF 海缆(电光效率固定为 1.5%)近 7 倍的能效。

除了 OA 参数外,芯间串扰也会影响多芯海缆的性能。图 4 为不同芯间串扰条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。可以看出,每 100 km 的芯间串扰为 -40 dB 对于多芯海缆是保证性能的底线。当串

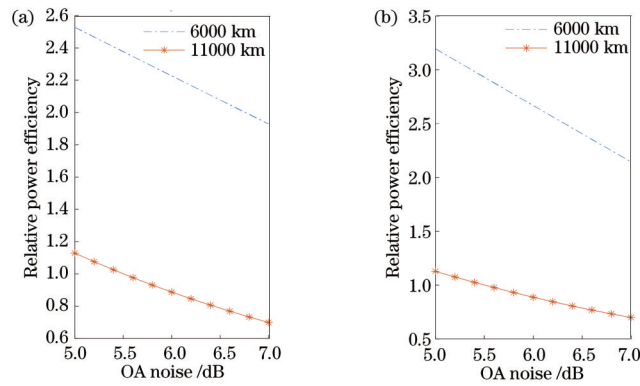


图 2 不同 OA NF 条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。(a) 4 芯海缆;(b) 7 芯海缆

Fig. 2 Relative power efficiency of MCF-based submarine cable to SMF submarine cable under different NFs of OA. (a) 4-core submarine cable; (b) 7-core submarine cable

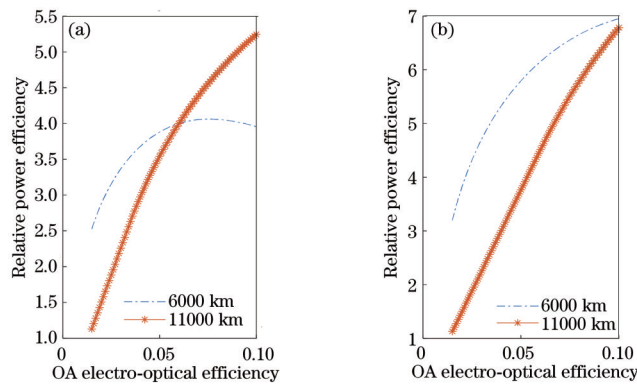


图 3 不同 OA 电光效率条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。(a) 4 芯海缆;(b) 7 芯海缆

Fig. 3 Relative power efficiency of MCF-based submarine cable to SMF submarine cable under different electro-optical efficiencies of OA. (a) 4-core submarine cable; (b) 7-core submarine cable

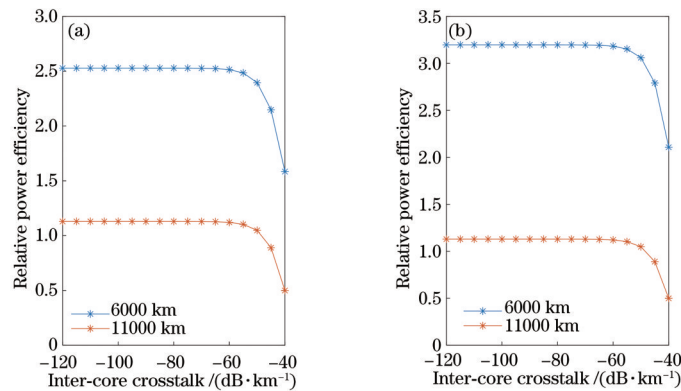


图 4 不同串扰条件下多芯海缆与 SMF 海缆的相对能效。(a) 4 芯海缆;(b) 7 芯海缆

Fig. 4 Relative power efficiency of MCF-based submarine cable to SMF submarine cable under different inter-core crosstalk. (a) 4-core submarine cable; (b) 7-core submarine cable

扰增至每 100 km 的芯间串扰为 -20 dB 时,多芯海缆能效优势明显降低。当然,在强耦合范畴内可以采用 MIMO 信号处理来解耦合。强耦合多芯光纤相比弱耦合光纤最大的优势是光纤非线性损伤。强耦合中的芯间耦合效应会导致单位光纤截面积的功率相较弱耦合低,因此其光纤非线性损伤较轻。针对两侧供电受限的海缆应用,光功率一般未达到光纤非线性阈值,因

此强耦合光纤在海缆中的优势尚未体现出来。此外,由于海缆传输距离较长,强耦合光纤制备时的预制棒材料、应力等差异会导致空间模式色散(SMD)和模式依赖损耗(MDL),这会在一定程度上影响 MIMO 信号处理。

综上所述可以看出,多芯海缆相比 SMF 海缆面临的挑战主要是中继器插损降低和高放大效率、低噪声多芯

放大技术的缺失。其中,中继器插损主要源于多芯光纤耦合器和熔接损耗。如果采用多芯包层泵浦放大技术,该部分插入损耗可以被有效降低。此外,采用稀土掺杂的多芯泵浦放大有望实现更高的放大效率^[12-14],但实现更低噪声的光放大是一个研究难点。采用分布式拉曼放大技术虽然具有理论更低的噪声指数^[15],但是其放大效率仍然无法满足海缆的需求。因此,高效率低噪声的 OA 是多芯海缆实际应用的关键。在海缆可容纳纤芯数目有限的条件下,采用空间分集技术相比传统 SMF 可获得更大的容量。因此,多芯海缆相比 SMF 海缆具有更大的研发潜力和商用潜力。

4 结 论

以最佳能效为目标对多芯光纤海缆通信系统的主要参数进行了优化理论推导,并且指出多芯海缆最优单跨长度只与光纤损耗有关。基于优化设置的多芯海缆相比 SMF 海缆具有更大的容量和更优的能效。在海缆最大容纳光纤数目为 32 的情况下:4 芯光纤在跨大西洋、跨太平洋场景中相比 M-SMF 海缆可以提升能效分别至 2.50 倍和 1.13 倍;7 芯光纤在跨大西洋、跨太平洋场景中相比 M-SMF 海缆可以提升能效分别至 3.20 倍和 1.13 倍。另外,采用更高电光效率的 OA 作为中继器,可以进一步提高多芯海缆的能效。

参 考 文 献

- [1] Downie J D. Maximum capacities in submarine cables with fixed power constraints for C-band, C+L-band, and multicore fiber systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 4025-4032.
- [2] Downie J D, Liang X J, Makovejs S. Assessing capacity and cost/capacity of 4-core multicore fibers against single core fibers in submarine cable systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(11): 3015-3022.
- [3] Sinkin O V, Turukhin A V, Sun Y, et al. SDM for power-efficient undersea transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 361-371.
- [4] Mélin G, Kerampran R, Monteville A, et al. Power efficient all-fiberized 12-core erbium/ytterbium doped optical amplifier[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 8-12, 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2020: M4C. 2.
- [5] Bolshtyansky M A, Sinkin O V, Paskov M, et al. Single-mode fiber SDM submarine systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1296-1304.
- [6] Dar R, Winzer P J, Chraplyvy A R, et al. Cost-optimized submarine cables using massive spatial parallelism[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3855-3865.
- [7] Hayashi T, Sasaki T, Sasaoka E. Behavior of inter-core crosstalk as a noise and its effect on Q-factor in multi-core fiber[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2014, E97.B(5): 936-944.
- [8] Hayashi T, Tamura Y, Hasegawa T, et al. Record-low spatial mode dispersion and ultra-low loss coupled multi-core fiber for ultra-long-haul transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 450-457.
- [9] Sakaguchi J, Awaji Y, Wada N Y, et al. Space division multiplexed transmission of 109-Tb/s data signals using homogeneous seven-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 658-665.
- [10] Ryf R, Alvarado J C, Huang B, et al. Long-distance transmission over coupled-core multicore fiber[C]//*42nd European Conference on Optical Communication*, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. London: VDE, 2016: 1-3.
- [11] Abedin K S, Fini J M, Thierry T F, et al. Multicore erbium doped fiber amplifiers for space division multiplexing systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2800-2808.
- [12] 张珂卫, 赵卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506003.
- [13] 汪小超, 范薇, 常丽萍, 等. 百皮秒脉冲在掺镱双包层光纤放大器中的放大[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1379-1384.
- [14] 孙鑫鹏, 赵长明, 杨苏辉. 高功率掺镱光纤放大器中频率上转换发光现象的研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1441-1444.
- [15] 冷进勇, 吴武明, 陈胜平, 等. 采用多级放大结构的单频拉曼光纤放大器的数值模拟[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0606007.
- Zhang K W, Zhao W, Xie X P, et al. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.
- Wang X C, Fan W, Chang L P, et al. 100 ps pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1379-1384.
- Sun X P, Zhao C M, Yang S H. Frequency-upconversion luminescence in high-power Yb³⁺-doped fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1441-1444.
- Leng J Y, Wu W M, Chen S P, et al. Simulation on single-frequency Raman fiber amplifiers utilizing multi-stage amplification scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0606007.