

400 Gb/s 通信系统传输距离容限的研究与设计

刘婷¹, 易祥^{2*}

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要:对影响高速率通信传输距离容限的入纤光功率进行了详细分析,针对入纤光功率受限问题,提出了一种基于远端铒纤放大(REOA)的系统解决方案,提高了高速率传输系统的等效入纤光功率,从而提高了系统的传输距离容限,并且理论分析了该系统方案的等效入纤功率与 REOA 前段光纤的损耗和 REOA 的输出功率有关。通过单载波 400 Gb/s 速率传输试验证实:REOA 系统比普通系统的等效入纤光功率提高了 14.27 dB,单跨距传输系统链路长度提高约 70 km。

关键词:高速率通信;等效入纤光功率;传输距离容限;远端铒纤放大

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)01-0027-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and design of transmission distance tolerance in 400 Gb/s communication system

LIU Ting¹, YI Xiang^{2*}

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of

China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: The influence of incident optical power on the transmission distance tolerance of high-rate communication is analyzed. In order to solve the problem which limits the incident optical power, a system solution based on remote Er-doped amplification technology (REOA) is proposed, which improves the equivalent incident optical power and the transmission distance tolerance greatly. It is theoretically analyzed that the equivalent incident optical power is related to the loss of the fiber in the front of REOA and the output power of REOA. The experiment of 400 Gb/s transmission demonstrates that the equivalent incident optical power of REOA system is 14.27 dB higher than that of conventional system, and the transmission distance is extended by about 70 km.

Key words: high-rate communication; equivalent incident optical power; transmission distance tolerance; remote Er-doped amplification

0 引言

近年来,随着更加复杂的编码方式的出现和波特率的提升,单载传输波速率也在不断地刷新纪录,从 100 Gb/s 到 200 Gb/s、400 Gb/s 甚至 600 Gb/s。此外,随着 5G 高速率时代的到来,长途通信网络特别是海底通信及特高压电力通信网络,对单跨传输系统提出

了更高的要求:在高速率、大容量的业务下实现同样,甚至更远跨距的传输^[1]。虽然,近年来国内外研究人员对高速率超长距离通信也有研究,但其中绝大多数都是对电层算法以及传输系统中光功率放大器(喇曼放大、遥泵放大等)的研究,或是对传输系统进行优化^[2-3],而对高速率传输系统做深入分析特别是入纤光功率的研究报道较少。

由于高速率传输使用了更高阶的调制方式,这使得系统对非线性的容忍度非常低,导致系统的入纤光功率不能太大。在系统末端光信噪比(OSNR)代价小于 0.5 dB 的情况下,10 Gb/s 速率最佳入纤功率可支持 17 dBm,但 200 Gb/s 速率的最佳入纤功率为 8 dBm,400 Gb/s 速率的最佳入纤功率只有 6 dBm,入

收稿日期:2019-08-01。

作者简介:刘婷(1982-)女,本科,高级工程师,主要从事电力系统通信方面的研究工作。参与设计青海-西藏 400 kV 直流联网通信、玉树-玛多 OPGW 光纤通信、西安南 750 kV 变电站通信等国家重大工程,多次获得电力行业“优秀工程设计一等奖”。

* 通信作者:易祥(E-mail: 13379299803@126.com)。



刘婷,易祥:400 Gb/s 通信系统传输距离容限的研究与设计

纤光功率的限制最终导致传输距离的受限。本文从高速率长距传输入纤光功率受限的问题出发,分析影响入纤光功率的主要因素,针对 400 Gb/s 速率传输系统入纤光功率受限问题,提出一种基于远端掺铒光纤放大(REOA)技术的系统解决方案。

1 等效入纤光功率的理论分析

在超长跨距光传输系统中,光功率、色散、非线性效应和 OSNR 是影响系统误码率、限制传输距离的主要因素。对于高速率相干通信系统,光功率可以通过功率放大器(BA)、喇曼放大器(RFA)和前置放大器(PA)等来解决,而色散和非线性在一定程度上也可通过数据信号处理(DSP)算法来弥补,因此 OSNR 是制约高速率通信传输距离的主要方面。在长距离传输系统中,系统末端的 OSNR 用线性单位可以表示为^[4]:

$$OSNR_{OUT} = P_m / [(F_{SYS} - 1) / G_{ALL} h \nu B_0] \quad (1)$$

其中, P_m 是系统的入纤光功率, F_{SYS} 是系统的等效噪声指数, G_{ALL} 是系统的总增益, h 为普朗克常量, ν 为光中心频率, B_0 为光带宽。当入纤功率越大时,系统 OSNR 也会越大;但入纤功率太高会产生受激布里渊散射(SBS)和受激喇曼散射(SRS)等非线性效应。SRS 是光子和光纤中热运动分子非弹性碰撞而产生,具有明显的阈值性,当信号光功率超过一定阈值时,信号光能量迅速向喇曼散射光转移,由于其较高的阈值功率,一般 SBS 先于 SRS 产生^[5]。SBS 是光纤通信过程中最容易发生的非线性效应,这是因为它的阈值功率 P_{th} 较低,当入纤光功率 P_m 超过 SBS 的阈值 P_{th} 时,由于信号光的作用使得光纤中产生大量的后向散射斯托克斯(Stokes)光,并且随着距离的增加散射的 Stokes 光功率会急剧增加,从而在系统中产生严重的噪声。因此,为保证系统的稳定性,入纤光功率应满足^[6]:

$$P_m < P_{th} \cong C \frac{K}{\gamma} \frac{A_{eff} \alpha}{[1 - \exp(-\alpha L)]} \left[\frac{\sqrt{\Delta v_B^2 + \Delta v_s^2}}{\Delta v_B} \right] \quad (2)$$

其中, C 为常数; γ 为 SBS 的增益系数,与波长和光纤纤芯材料有关; K 为偏振相关因子(保偏光纤 $K=1$, 普通单模光纤 $K=2$); A_{eff} 为光纤有效面积, α 为光纤的损耗系数; L 为光纤的长度; Δv_B 为受激布里渊谱宽,与光纤类型和波长有关, Δv_s 为调制信号的光谱宽度,与调制格式和信号速率有关^[6]。在保证调制信号格式(16QAM)和速率不变(400 Gb/s)的情况下,本文将式(2)进行二维拟合。光纤的损耗系数和有效面积与入纤光功率的关系如图 1 所示。可以看出, SBS 阈值功

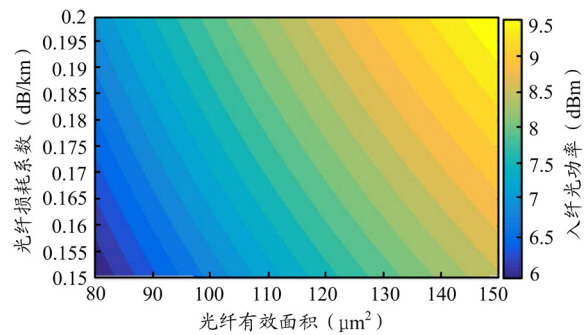


图 1 光纤损耗系数和有效面积与入纤光功率的关系

率随着光纤的有效面积和损耗系数的增加而提高,因此理论上可以研制一种有效面积大,并且损耗系数也大的光纤(SBS 阈值高),使得光纤可支持较高的入纤功率。但由于技术条件和成本的原因,目前选择一种合适有效面积和损耗系数的光纤来较大地提升系统的入纤光功率实现起来较为困难。

为较大提升系统的入纤光功率,本文在距离系统发送端一定距离处引入一个 REOA,通过改变系统设计来提升系统等效入纤光功率。假设系统只有 BA、PA,以及引入的 REOA,则对于 BA+REOA+PA 的超长距系统,系统总增益 G_{ALL} 用线性公式可表示为:

$$G_{ALL} = G_B G_{DR} T_1 G_{RE} T_2 G_P \quad (3)$$

其中, G_B 为功率放大器的增益; G_{DR} 表示分布式喇曼放大器的增益; T_1 为 REOA 前端光纤线路的传输损耗; G_{RE} 为远端掺铒光纤放大器的增益; T_2 为 REOA 后端光纤线路的传输损耗; G_P 为前置光纤放大器的增益。系统总等效噪声指数 F_{SYS} 可由级联系统等效噪声指数的计算公式得出^[4]:

$$F_{SYS} = NF_B + \frac{NF_{DR} - 1}{G_B} + \frac{T_1 - 1}{G_B G_{DR}} + \frac{NF_{RE} - 1}{G_B G_{DR} \frac{1}{T_1}} + \frac{T_2 - 1}{G_B G_{DR} \frac{1}{T_1} G_{RE}} + \frac{NF_P - 1}{G_B G_{DR} \frac{1}{T_1} G_{RE} \frac{1}{T_2}} \quad (4)$$

其中, NF_B 、 NF_{DR} 、 T_1 、 NF_{RE} 、 T_2 和 NF_P 分别是功率放大器、分布式喇曼放大器、REOA 前端光纤线路、远端掺铒光纤放大器、REOA 后端光纤线路和前置放大器的噪声指数。系统 REOA 的输出功率线性公式表示为:

$$P_{REOUT} = P_m G_B G_{DR} \frac{1}{T_1} G_{RE} \quad (5)$$

先将式(3)、式(4)和式(5)代入式(1)中,用单位 dB 表示为:

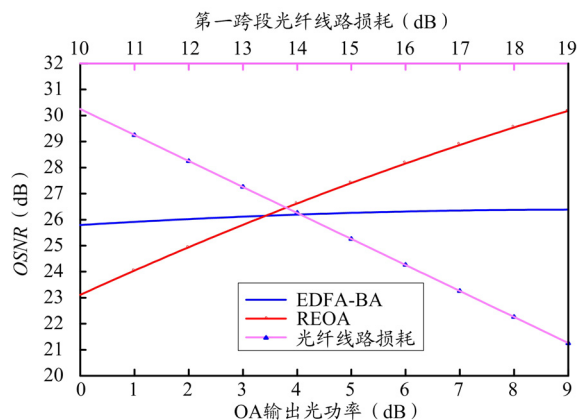
$$OSNR_{OUT}(dB) = P_{REOUT}(dB) + T_1 - F_{SYS}(dB) - 10 \log h \nu B_0 \quad (6)$$

再将式(6)与 ITU-T G.692 标准信噪比公式^[7]相比较, 可以发现 REOA 系统等效入纤功率相当于 REOA 的输出功率 PRE_{OUT} 和 REOA 前端光纤线路的传输损耗 T_1 之和。

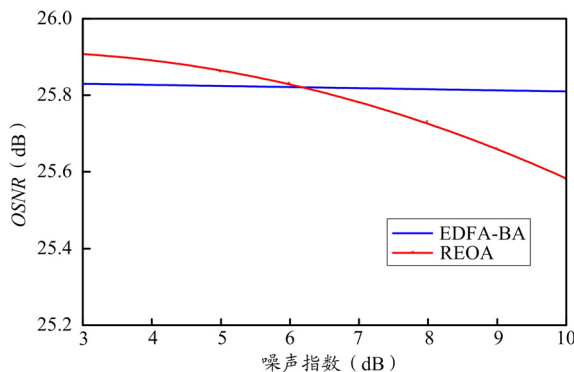
为具体分析系统输出 OSNR 和 BA、REOA 以及 REOA 前端光纤线路损耗 T_1 的关系, 本文在只改变一个变量的情况下, 对式(1)进行仿真计算, 如图 2(a)所示。对于 BA+REOA+PA 系统, BA 的输出功率大小对系统 OSNR 基本没影响, 而 REOA 的输出功率大小及 REOA 前端光纤线路损耗对系统输出端 OSNR 有线性关系的影响。同样在保证只改变一个参数的情况下, 对 BA 和 REOA 的噪声指数进行仿真计算, 如图 2(b)所示。BA 的噪声指数对输出端 OSNR 基本没影响, 而 REOA 的噪声指数和输出端的 OSNR 有一个非线性的关系。因此, 系统输出的 OSNR 基本与功率放大器 BA 无关, 和 REOA 的输出功率及 REOA 前的光纤损耗有着线性的关系, 这也与式(6)计算出的结果基本相符合。

2 实验验证及结果分析

为进一步验证 REOA 对高速率长距通信系统等效入纤光功率的提升能力, 分别对有、无 REOA 的 2 个系统进行了实验测试, 实验系统如图 3 所示。可以看出, 在 BA+REOA+PA 系统中间引入一个 REOA, 并且在发送端有一个远端泵浦单元(RPM)提供泵浦光, 光纤均采用 G.652 光纤, 线路侧模块速率为单载波 400 Gb/s, 调制格式为 16QAM, 客户侧与误码仪相连接。调节 REOA 的泵浦功率, 使得 REOA 工作在最佳状态, 并保证 2 个系统的发送端的光功率以及跨损不



(a) BA、REOA 输出功率和第一段光纤线路损耗 (T_1) 对 OSNR 的影响



(b) BA 和 REOA 的噪声指数对 OSNR 的影响

图 2 不同因素对系统 OSNR 影响

变, 误码仪挂机 12 h 均无误码, 分别扫描 2 种系统发送端、接收端以及 REOA 输出端光谱图, 如图 4 所示。可以看出, 系统观测处的波形基本一致, 说明 REOA 并未对信号波形产生畸变。此外, 在 BA+PA 系统线路中间和 BA+REOA+PA 系统线路中间接入可调光衰减器 (VOA), 分别调节 VOA 及发送端功率, 通过观测误码

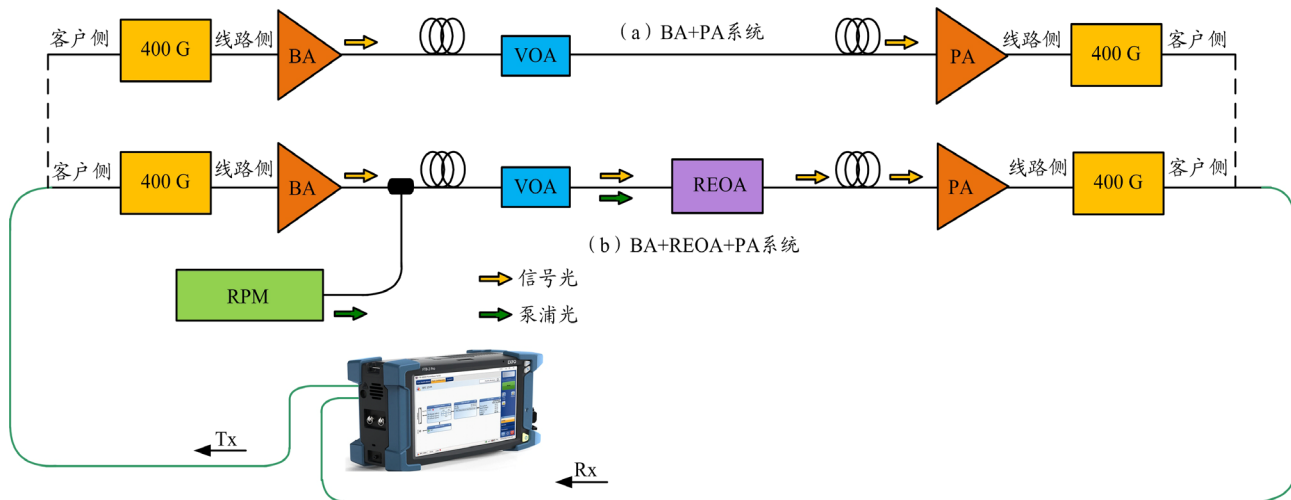
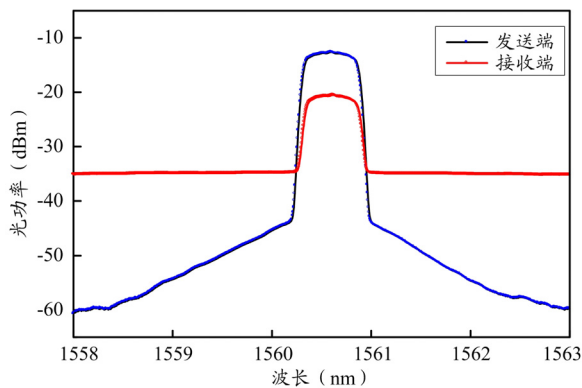
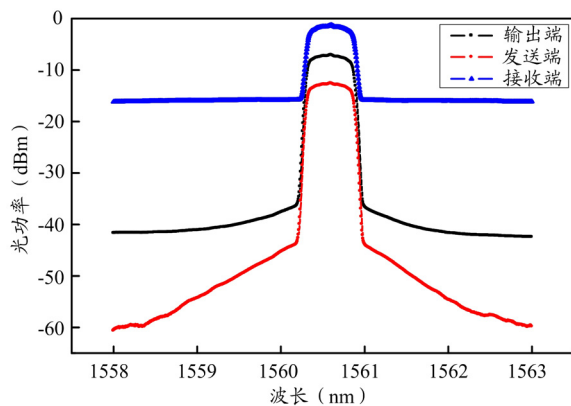


图 3 系统验证原理图



(a) BA+PA 系统输出端和接收端光谱图



(b) REOA 系统输出端、接收端及 REOA 输出端光谱图

图 4 2 种系统发送、接收端以及 REOA 输出端光谱图

仪及接收端 OSNR (保持在 21 dB 左右), 使得系统到达极限状态, 测得 2 种系统的极限跨损、等效入纤功率及末端 OSNR 的数据如表 1 所示。在系统极限信噪比情况下, BA+REOA+PA 系统比 BA+PA 系统极限跨损多 14.3 dB, 等效入纤功率提高 14.27 dBm。

表 1 2 种系统在极限情况下的数据对比

系统	系统极限 跨损(dB)	等效入纤光 功率(dBm)	接收端极限 OSNR(dB)
BA+PA	38	6	21
BA+REOA+PA	52.3	20.27	21.2

REOA 系统和 BA+PA 系统随着传输距离的增加, 信号光功率的变化如图 5 所示。当传输距离为 0 时, BA+PA 系统的入纤光功率为 6 dBm, REOA 系统入纤功率是 -1.91 dBm; 随着传输距离的增加 BA+PA 系统信号光功率逐渐衰减, 而对于 REOA 系统在 112 km 之前, 由于喇曼作用信号光功率先增加后减小, 经过 REOA 后, 信号光功率提升至 2.62 dBm 然后逐渐衰减, 此传输过程可等效拟合为等效入纤光功率为 20.27 dBm 的 BA+PA 系统传输(图 5 虚线部分), 可以看出 REOA 系统传输的距离比 BA+PA 系统有明显的增加。

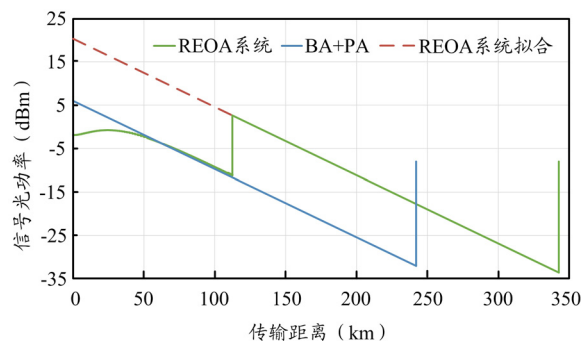


图 5 不同系统信号光功率随传输距离的变化

3 结束语

本文对影响 400 Gb/s 速率传输距离容限的入纤光功率进行了详细的分析与仿真, 并设计出了一种基于远端掺铒光纤放大器(REOA)的系统方案来提升系统的等效入纤功率, 从而提升系统传输距离容限; 通过推理和仿真证明 REOA 系统中等效入纤光功率为 REOA 前段光纤损耗与 REOA 输出光功率之和。实验表明: 单载波 400 Gb/s 速率的 REOA 传输系统, 其等效入纤光功率(20.27 dBm)比 BA+PA 系统的等效入纤光功率(6 dBm)提高了 14.27 dB, 极限跨损提高了 14.3 dB, 这证明了利用 REOA 提升系统传输距离容限的正确性, 这种利用 REOA 提升系统等效入纤从而提升传输距离容限的方案对实现高速率超长距离传输提供了重要的设计支撑。

参考文献:

- [1] 徐健, 付成鹏. 超长跨距无中继光传输系统中远程增益单元的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100602-1-100602-4.
- [2] GNAUCK A H, FELLOW, WINZER P J, et al. 10×224 Gb/s WDM Transmission of 56 Gbaud [J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2010, 13(22): 214-218.
- [3] KARALEKAS V, ANIA-CASTAÑÓN J D, HARPER P. Impact of nonlinear spectral broadening in ultra-long Raman fibre lasers [J]. OPTICS EXPRESS, 2007, 25(15): 16690-1-16690-4.
- [4] 杨宁, 杨铸. DWDM 系统中级联 EDFA 光信噪比计算[J]. 通信学报, 2003, 24(1): 75-82.
- [5] AGRAWAL G P. Nonlinear Fiber Optics [S]. New York: Academic Press, 1995.
- [6] SHIMIZU T, NAKAJIMA K, SHIRAKI K, et al. Evaluation methods and requirements for the stimulated Brillouin scattering threshold in a single-mode fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2008, 14(1): 10-15.
- [7] ITU-T. G.692-1998: Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers [S]. Geneva: ITU-T, 1998.