

100Gb/s 551km G.654.E 光纤超长距离传输系统研究

孙淑娟¹ 李伟华² 邓黎² 李葵³ 林航³ 汪洪海⁴ 张磊⁴ 陈方正⁵

(1.武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205;2.国家电网公司
信息通信分公司,北京 100761;3.国网安徽省电力公司 信息通信分公司,合肥 230061;
4.长飞光纤光缆股份有限公司,武汉 430073;5.国网河北省电力公司 信息通信分公司,石家庄 050021)

摘要:不断发展的电力通信网对大容量、无中继光传输系统提出了更高的要求。采用有效面积 G.654.E 光纤作为传输介质,利用非线性抑制技术、二阶泵浦技术以及前后向随旁路遥泵放大器(ROPA)技术,通过理论分析和系统传输实验,实现了 100Gb/s 系统 551km 的单跨段超长站距传输。

关键词:大有效面积光纤;二阶泵浦;遥泵放大器;超长跨距光传输系统

中图分类号:TN914 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2018)06-0049-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.06.013

Research on 100Gb/s ultra-long span optical transmission system over 551km of G.654.E fiber

SUN Shujuan¹, LI Weihua², DENG Li², LI Kui³,
LIN Hang³, WANG Honghai⁴, ZHANG Lei⁴, CHEN Fangzheng⁵

(1.Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430205, China;
2. State Grid Information and Telecommunication Branch, Beijing 100761, China;
3. State Grid Anhui Information & Telecommunication Company, Hefei 230061, China;
4. Yangtze Optical Fiber& Cable Co. Ltd., Wuhan 430073, China;
5. State Grid Hebei Information & Telecommunication Company, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The continuous development of power communication network puts forward higher requirements for large capacity and unrepeated optical transmission systems. Through theoretical analysis and system transmission testing, using effective area G.654.E fiber as transmission medium, using nonlinear suppression technology, second-order pumping technology and bi-directional associated and bypass remote optically pumped amplifier (ROPA) technology, a 551km ultra-long span unrepeated transmission in a 100Gb/s optical transmission system is realized.

Key words: large effective area fiber; second-order pumping; remote optically pumped amplifier (ROPA); ultra-long span optical transmission system

0 引言

随着全球能源互联网战略的实施,作为全球能源互联网骨架的特高压电网以及神经网的智能电网建设迫切需要大容量传输技术的有效支撑,而且由于特

收稿日期:2017-11-17。

基金项目:国家电网公司科技项目资助;工信部强基工程超低损耗光纤项目(0714-EMTC02-5593)资助。

作者简介:孙淑娟(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信系统方面。

高压输电的特性,交流特高压电网站距一般在 300~400km 之间,直流特高压联网工程的站距更是高达 1000km 以上,不断发展的电力通信网对无中继光传输系统提出了更高的要求。为了实现大容量的信息传输和更少的中继站建设,需要通过研究新技术来进一步提高系统传输容量、延长无中继传输距离,从而为电力系统的安全、可靠和经济运行提供保障^[1]。大容量超长距无中继光传输线路中的无中继设备提高了系统

孙淑娟, 李伟华, 邓黎, 等: 100Gb/s 551km G.654.E 光纤超长距离传输系统研究

的稳定性和可靠性, 特别适用于海底和地理环境比较恶劣的长距离通信场合^[2]。因此, 研究实用化的无中继超长站距光传输技术, 对我国特高压工程的发展和建设具有非常重要的现实意义。

大有效面积光纤具有更低的衰减系数和更大的有效面积, 适合于高速超长距离传输, 是一种可满足目前与未来光传输发展趋势的新型光纤。为此, 本文以长飞公司大有效面积 G.654.E 光纤为传输介质, 对 100Gb/s 超长距无中继光传输系统进行实验研究。

1 实验系统设计

本文以大有效面积光纤作为传输介质, 综合利用非线性抑制技术、二阶泵浦放大技术以及逐泵放大技术来实现 100Gb/s 单跨段 551km 超长距传输, 传输系统框图如图 1 所示。

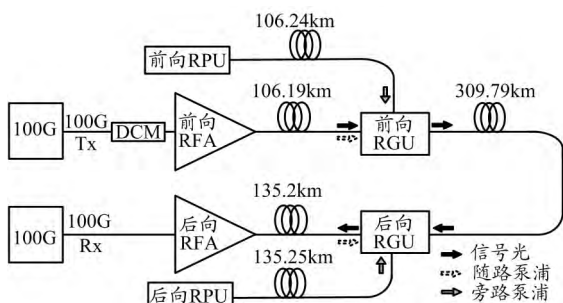


图 1 100Gb/s 551km 无中继超长跨距传输系统

系统发射端包括 100G 业务单元、80km 色散补偿模块(DCM)、二阶前向喇曼放大器(RFA)和由远程泵浦单元(RPU)与远程增益单元(RGU)组成的前向旁路逐泵放大器(ROPA)。100G 业务单元发送偏振复用正交相移键控(Polarization-multiplexed Quadrature Phase Shift Keying, PM-QPSK)调制信号。接收端采用二阶后向 RFA 和后向旁路 ROPA。前向 RGU 放置于距发射端 106.19km 位置处, 后向 RGU 位于距接收端 135.25km 处, 前向、后向 RGU 之间光纤长度为 309.79km。

光纤是光信号的传输媒介, 可以通过降低光纤衰减系数和增大有效面积来提升系统的光信噪比(OSNR)预算和传输距离。G.654.E 光纤采用纯硅纤芯的技术, 使光纤衰减进一步降低, 包层中采用掺杂氟等元素的方式来降低包层的折射率。同时, 该光纤通过增大光纤的有效面积来降低非线性效应影响。我们列出了 G.654.E 光纤与 SMF-28 ULL 光纤和普通 G.652 光纤在 1550nm 波长条件下的损耗、色散和模场直径等参数的对比情况^[3], 如表 1 所示。可以看出,

表 1 G.654.E、SMF-28 ULL 和 G.652 光纤的相关参数对比

光纤参数	G.654.E 光纤	SMF-28 光纤	G.652 光纤
损耗 (dB/km)	≤0.16	≤0.17	0.20
色散 (ps/nm·km)	≤22	≤18	≤20
色散斜 (ps/nm ² ·km)	0.05~0.07	0.092	0.093
模场直径 (μm)	11.4~12.2	11.2	10.4
有效面积 A_{eff} (μm ²)	110	85	84

G.654.E 光纤具有更低的衰减系数和更大的有效面积, 可进一步减小非线性效应影响, 延长无中继传输距离。本实验采用的 G.654.E 光纤平均损耗系数为 0.158dB/km, 平均有效面积为 110μm²。

为了抑制非线性效应, 本文结合理论计算和仿真分析, 在 RFA 之前采用了 80km 的色散补偿光纤, 使得信号入纤时的总色散为负, 脉冲展宽, 从而抑制光纤的非线性效应和喇曼泵浦产生的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)。 $R_{forward-s}$ 为前向喇曼信号光的 RIN, $R_{backward-s}$ 为后向喇曼信号光的 RIN。

$$R_{forward-s} \approx R_p + 20\lg(\ln(G_R)) + 10\lg\left(\frac{(V_s/L_{eff})^2}{(a_p V_s)^2 + (bf)^2}\right) \quad (1)$$

$$R_{backward-s} \approx R_p + 20\lg(\ln(G_R)) + 10\lg\left(\frac{(V_s/L_{eff})^2}{(a_p V_s)^2 + (4\pi f)^2}\right) \quad (2)$$

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (3)$$

$$b = 2\pi \left(1 - \frac{V_s}{V_p}\right) = 2\pi \cdot D \cdot \Delta_\lambda \cdot V_s \quad (4)$$

其中, R_p 为泵浦的 RIN, G_R 为喇曼增益, V_s 和 V_p 分别为信号光和泵浦光群速度, L_{eff} 为光纤的有效长度, f 为泵浦调制系数, a_p 为泵浦的损耗系数, D 为色散量, Δ_λ 为信号与泵浦的波长差, α 为光纤的损耗系数, L 为光纤实际传输的距离。

为了进一步提升系统的传输距离, 实验采用了高阶泵浦技术, 设计了一种更高喇曼增益和更小等效噪声指数(Efficient Noise Figure, ENF)的二阶 RFA。二阶 RFA 包括 1360nm 和 1450nm 两种泵浦源, 当两种泵浦光同时进入传输光纤时, 1360nm 的泵浦光对 1450nm 的泵浦光进行放大, 1450nm 的泵浦光再对信号光进行放大, 从而可以获得更高的喇曼增益和更好的噪声性能。

同时, 本系统还采用了随旁路结合的 ROPA 来提高系统的功率预算, 延长系统的传输距离^[4]。ROPA 中

RGU 的光路结构如图 2 所示, 在前向 RGU (如图 2(a) 所示), 随路前向喇曼提供的残余泵浦光与业务光在 A 点通过 WDM 进行分离, 在 C 点进行合波, 为掺铒光纤提供后向泵浦; 旁路泵浦光在 B 点与业务光合波, 并为掺铒光纤提供前向泵浦光, 这种结构可实现 EDFA 双向泵浦放大。后向 RGU 结构 (如图 2(b) 所示) 类似于前向 RGU, 差别在于后向 RGU 结构中, 信号光与随路后向喇曼提供的残余泵浦光从不同的方向进入 RGU。同时, 为了降低噪声指数, 后向 RGU 采用隔离器 (ISO) 将铒纤分为两部分, ISO 能有效抑制第一段掺铒光纤的反向放大自发辐射 (ASE) 噪声。

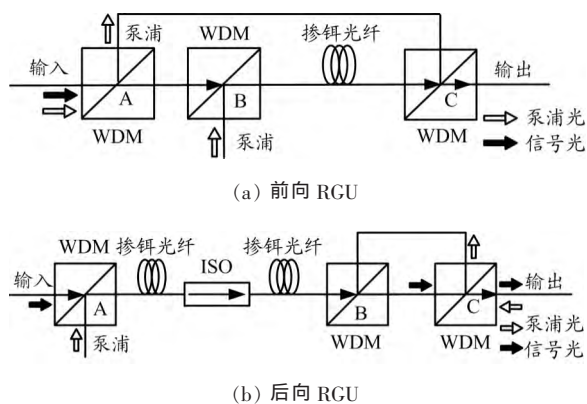


图 2 RGU 的光路结构图

2 实验结果与分析

在实验过程中, 我们对传输系统的关键节点光功率、光纤损耗、信噪比、长期误码率和系统稳定性进行了测试。实验链路总长度为 551.18km, 线路总损耗为 87.34dB, 得到传输光纤光功率的变化情况如图 3 所示。系统的入纤光功率为 -12.22dBm , 经过二阶喇曼的分布式放大后, 前向 RGU 的输入光功率为 0.12dBm , 输出光功率为 10.86dBm , 其增益为 10.74dB 。测试得到二阶前向 RFA 的开关增益是 29.38dB (在二阶喇曼放大器关泵的情况下, 前向 RGU 的输入光功率为 -29.26dBm)。经过中间段 309.79km 光纤传输后, 进入后向 RGU 的信号光功率为 -38.13dBm , 此时后向 RGU 的增益为 26.7dB 。在接收端的信号光功率为 -17.58dBm , 光信噪比为 14.22dB , 接收端的信号光谱图如图 4 所示。

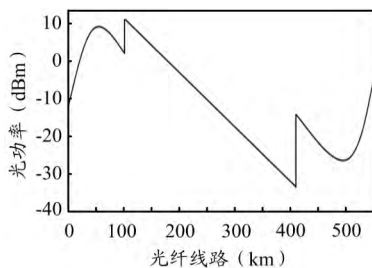


图 3 传输系统的光功率变化

在测试期间系统稳定运行, 连续 48h 无误码, 平

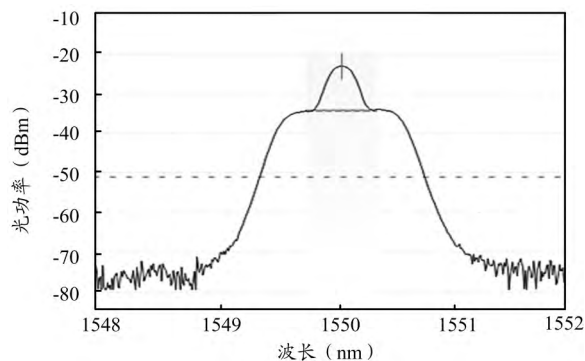


图 4 接收端信号光谱图

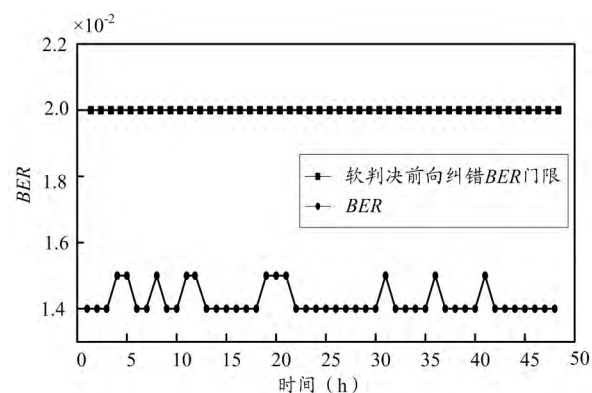


图 5 48 小时误码率变化

均软判决前向纠错误码率 (BER) 为 1.42×10^{-2} , 48h 误码率变化如图 5 所示。

3 结束语

本文综合应用现有的 100Gb/s 传输技术, 采用双向二阶喇曼光纤放大器和双向 ROPA 等技术, 成功实现了基于大有效面积光纤的 100Gb/s 551km 无中继超长跨距无误码传输。本文的研究成果对今后我国超长跨距无中继光传输工程的建设具有一定的参考作用, 为未来高速率超长距传输系统的发展奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 姜利民, 罗玉兴, 印新达, 等. 电力系统光纤通信超长站距传输技术的研究[J]. 电力系统通信, 2008, 29(3): 22-27.
- [2] LI B, TOWERY C, CHANG D, et al. Ultra-long unrepeated transmission over 607km at 100G and 632km at 10G [J]. Optics Express, 2015, 23 (19): 25028-25033.
- [3] 董振华, 印新达, 黄丽艳, 等. 521km 超长站距无中继光传输系统研究[J]. 光通信研究, 2011(1): 5-8.
- [4] 徐健, 付成鹏, 卜勤练, 等. 基于 MATLAB GUI 的遥泵系统的设计与研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(10): 7-9.