

基于WDM-PON架构的5G前传网络中SRS效应分析

许岩,许亮,李振,刘鑫,张文静,王帅*

(枣庄学院 光电工程学院,山东 枣庄 277160)

摘要:为探究基于波分复用无源光网络(WDM-PON)架构的第五代移动通信(5G)前传网络中受激喇曼散射(SRS)非线性效应对系统性能的影响,通过仿真研究了C波段和O波段2种波长分配方案下SRS引起的功率变化及灵敏度损失。在C波段配置中,当5G前传上下行波长独立传输时,SRS导致的功率损耗为1.3 dB,灵敏度劣化0.6 dB;而在多系统共传场景下,上行高频信道功率损耗增至10.1 dB,系统误码率(BER)性能严重退化。相比之下,O波段配置下的最大功率损耗与灵敏度劣化分别被控制在1.5 dB和0.5 dB以内。研究表明,O波段由于其较低的喇曼增益效率和宽波长间隔特性,在缓解SRS效应方面表现更优。

关键词:第五代移动通信前传;波分复用无源光网络;受激喇曼散射非线性损伤;功率变化;灵敏度损失

中图分类号:TN913.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0099-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.018

Analysis of SRS effect in 5G fronthaul transmission networks based on WDM-PON architecture

XU Yan, XU Liang, LI Zhen, LIU Xin, ZHANG Wenjing, WANG Shuai*

(School of Optoelectronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong 277160, China)

Abstract: To investigate the impact of the stimulated Raman scattering (SRS) nonlinear effect on the performance of fifth-generation mobile communication (5G) fronthaul networks based on wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) architecture, a simulation study is conducted on the power variation and sensitivity loss induced by SRS under two wavelength allocation schemes in the C-band and O-band. In the C-band configuration, when the 5G fronthaul uplink and downlink wavelengths are transmitted independently, the power loss due to SRS was 1.3 dB, with a sensitivity degradation of 0.6 dB. However, in a multi-system co-transmission scenario, the power loss for the high-frequency uplink channel increased to 10.1 dB, resulting in severe degradation of the bit error rate (BER) performance. In contrast, under the O-band configuration, the maximum power loss and sensitivity degradation are controlled within 1.5 dB and 0.5 dB, respectively. The study demonstrates that the O-band, owing to its lower Raman gain efficiency and wider wavelength spacing characteristics, performs better in mitigating the SRS effect.

Key words: fifth-generation mobile communication fronthaul, wavelength division multiplexing passive optical network, stimulated Raman scattering nonlinear impairment, power variation, sensitivity penalty

0 引言

随着第五代移动通信(5G)技术的商用化部署,其

收稿日期:2024-11-06。

基金项目:枣庄学院“博士科研启动基金”项目(1020732)资助。

作者简介:许岩(1989—),男,山东枣庄人,博士,讲师。硕士毕业于山东科技大学信号与信息处理专业,博士毕业于上海大学通信与信息系统专业,现工作于枣庄学院光电工程学院。主要研究方向为光纤通信技术、光纤非线性损伤。

*通信作者:王帅(1989—),女,博士,讲师,主要研究方向为储备池计算、光纤通信技术。



在容量、灵活性、能效和端到端延迟等方面的性能得到了显著提升^[1]。预计到2025年底,全球移动网络服务将覆盖65亿人口,同时支持400亿个智能终端设备和1 000亿次全球连接^[2-3]。为满足日益增长的高传输容量和速率需求,云/集中式无线接入网(C-RAN)应运而生,其架构由集中单元(CU)、分布单元(DU)和有源天线单元(AAU)组成^[4]。其中,DU与AAU之间的前传链路是关键组成部分。目前,5G前传网络的承载方案主要包括光纤直连、无源波分复用、有源波分复用/光传送网以及波分复用无源光网络(WDM-PON)^[5-6]。其

许岩,许亮,李振,等:基于WDM-PON架构的5G前传网络中SRS效应分析

中,WDM-PON凭借其节省光纤资源、降低成本及促进固定网与移动网融合的优势,成为研究热点^[7]。在波长分配方面,C波段和O波段因其各自在光纤衰减、色散特性及商业化程度上的优势,成为5G前传网络的潜在选择^[8]。

然而,当5G前传网络的上下行波长在同一光纤中传输时,受激喇曼散射(SRS)非线性效应会引入显著的功率损耗和信号串扰^[9]。由于5G前传的波长资源可能需要与Super-PON、NG-EPON等现有标准共存,未来固定、移动融合的光接入网将面临更为严峻的挑战。例如,Super-PON采用C/L波段16个波长对(信道间隔100 GHz,速率10 Gb/s),覆盖范围达50 km^[10];而NG-EPON则利用多个上行(1 260~1 322 nm)和下行(1 340~1 360 nm)波长支持25/50 Gb/s高速传输^[11]。如此宽的光谱范围将导致更严重的SRS效应,进而影响系统链路预算(通常要求大于等于25 dB)^[12]。

针对PON中的SRS效应,已有研究揭示了其对不同系统的负面影响。例如,GAUDINO R等人^[13-14]发现SRS会导致吉比特无源光网络(GPON)信号产生4 dB功率损耗。LI J等人^[9,15]分析了SRS对NG-PON2和前传信号的功率扰动及灵敏度损失。XU Y等人^[16-17]则评

估了Super-PON和NG-EPON标准下SRS对系统的影响。然而,随着未来网络融合趋势的加强,5G前传波长与多标准共存场景下的SRS效应尚未得到充分研究,尤其是其对链路预算的潜在威胁仍需深入探讨。

本文基于WDM-PON架构的5G前传网络,通过仿真研究SRS非线性效应引起的功率变化和灵敏度损失,旨在为未来融合光接入网的设计提供理论依据和优化方向。

1 仿真系统搭建

为研究SRS非线性损伤对WDM-PON架构下C波段与O波段5G前传网络的影响,本文分别构建了2种波段的仿真系统,重点分析SRS效应最为显著的多波长共存场景。仿真系统原理框图分别如图1、图2所示,仿真参数分别如表1、表2所示。

为量化SRS导致的灵敏度损失,2种系统均选取最高频率信道(C波段198.5 THz,O波段237.9 THz),在WDM与单波长传输条件下分别测量其误码率(BER),使用雪崩光电二极管(APD)接收并由BER分析仪进行评估。

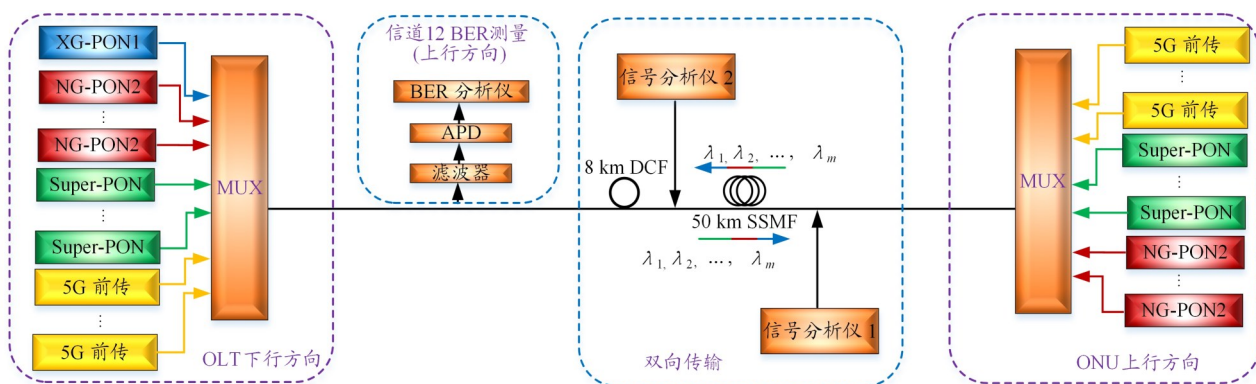


图1 C波段仿真系统原理框图

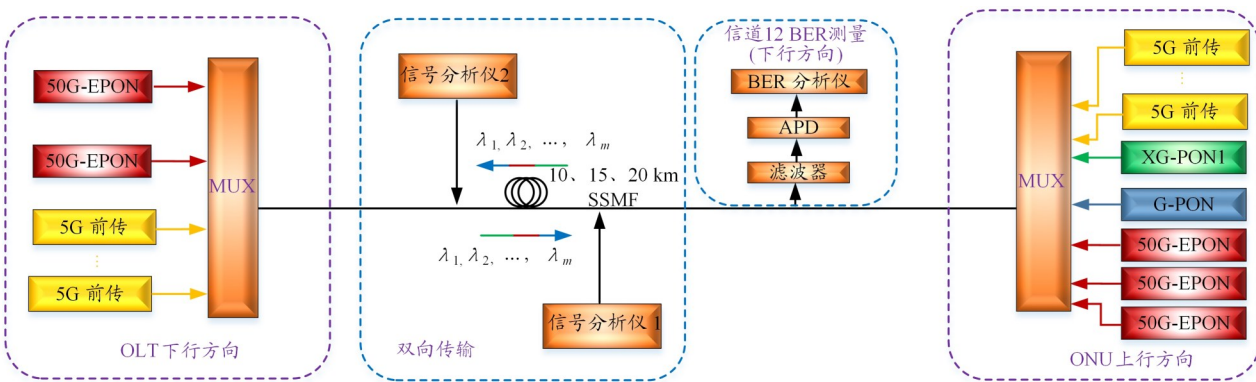


图2 O波段仿真系统原理框图

许岩, 许亮, 李振, 等: 基于 WDM-PON 架构的 5G 前传网络中 SRS 效应分析

表 1 采用 C 波段时研究 5G 前传网络中 SRS 非线性损伤的仿真参数

参数	数值
上行波长/THz	197.4~198.5
下行波长/THz	184.6~185.7
信道间隔/GHz	100 ^[22]
调制速率/(Gb/s)	25(5G 前传) ^[19] 、10(NG-PON2, Super-PON 和 XG-PON1) ^[18, 23]
光纤衰减系数/(dB/km)	0.24 ^[24]
MUX 和 DEMUX 插入损耗/dB	1.5 ^[25]
啁啾系数	0 ^[18]
输入功率/(dBm/channel)	8 ^[26] 、12(Super-PON) ^[27]
APD 暗电流/nA	10 ^[28]
光纤色散系数/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	16 ^[29]
色散补偿光纤(DCF)色散系数/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	-100 ^[30]
光纤长度/km	10、15、20 ^[17, 21] 、50 km (Super-PON) ^[18]

表 2 采用 O 波段时研究 5G 前传网络中 SRS 非线性损伤的仿真参数

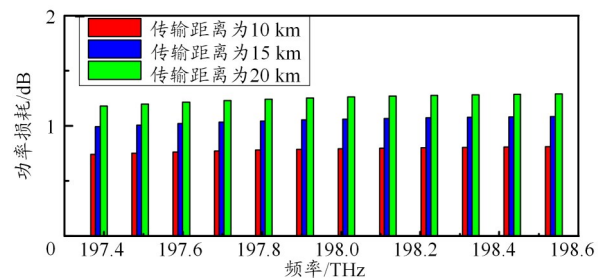
参数	数值
上行波长/THz	220.4~229.2
下行波长/THz	228.9~237.9
信道间隔/GHz	800 ^[31]
调制速率/(Gb/s)	25(5G 前传和 50G-EPON) ^[11, 19] 、10(XG-PON1) ^[23] 、1(GPON) ^[32]
光纤衰减系数/(dB/km)	0.34 ^[33]
MUX 和 DEMUX 插入损耗/dB	1.5 ^[25]
啁啾系数	0 ^[20]
输入功率/(dBm/channel)	8 ^[26]
光纤色散系数/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	2 ^[34]
APD 暗电流/nA	10 ^[28]
光纤长度/km	10、15、20 ^[17, 21]

2 分析与讨论

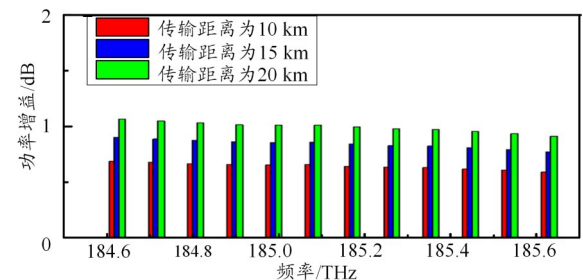
2.1 C 波段波长分配方案条件下的 SRS 非线性损伤

2.1.1 5G 前传上下行波长之间的 SRS 非线性损伤

根据理论分析, SRS 非线性效应会导致传输波长间产生功率转移。为深入评估所提方案的性能, 本文通过仿真/实验分析了 5G 前传上下行波长在共纤传输条件下的 SRS 效应特性, 结果如图 3 所示。本文定义的 SRS 功率变化(损耗/增益)是指同时受光纤衰减和 SRS 效应影响的传输光谱与仅考虑光纤衰减的理想光谱之间的功率差值。



(a) 上行



(b) 下行

图 3 SRS 非线性损伤引起的 5G 前传波长功率变化

当 5G 前传上下行波长独立传输时, 上行波长作为高频泵浦信道将承受 SRS 效应导致的功率损耗。其中, 5G 前传上行信道的信道 12(198.5 THz)作为传输频段内的最高频率成分, 将受到最显著的 SRS 效应影响。从图 3(a)可以看出, 当传输距离为 10 km 时, SRS 效应对信道 12 造成的功率损耗达到 0.8 dB。根据 SRS 非线性损伤基本理论分析^[14, 35]可知, SRS 非线性损伤引起的功率损耗取决于有效光纤长度, 随着传输距离延长至 15 km, 波长间的非线性相互作用时间相应增加, 导致功率损耗加剧至 1.1 dB。当传输距离进一步扩展至 20 km 时, 信道 12 的功率损耗显著增大至 1.3 dB, 证实了 SRS 效应对系统性能的累积性影响。

与上述结果相反的是, 由于 5G 前传下行波长位于较低频率范围, 因此其作为斯托克斯波, 在 SRS 非线性效应作用下将产生功率增益。以 5G 前传下行波段中

许岩, 许亮, 李振, 等: 基于 WDM-PON 架构的 5G 前传网络中 SRS 效应分析

频率最低的信道 1 (184.6 THz) 为例进行分析, 其波长功率变化如图 3(b) 所示。可以看出, 经过 10 km 光纤传输后, 由 SRS 非线性效应引起的功率增益为 0.7 dB; 当传输距离分别增至 15 km 和 20 km 时, 相应的功率增益分别达到 0.9 dB 和 1.1 dB。

图 4 为 5G 前传上下行波长单独传输时信道 12 的 BER 曲线。此处, 灵敏度劣化定义为单波长传输与多波长并行传输条件下接收灵敏度的差值。本文选取 5G 前传上行波段中信道 12 (198.5 THz, 为上下行波长中频率最高者) 作为研究对象。在 BER 阈值为 1×10^{-3} (对应 7% 硬判决前向纠错^[36])、传输距离为 10 km 时, 信道 12 在单波长传输时的接收灵敏度为 -25.1 dB; 而在与其它波长共传时, 其接收灵敏度为 -24.6 dB, 表明 SRS 非线性效应引入的灵敏度劣化为 0.5 dB。根据 SRS 非线性损伤基本理论分析^[14, 35]可知, SRS 引起的串扰效应与有效增益长度密切相关, 因此随着传输距离的延长, 灵敏度劣化程度随之加剧。当传输距离增至 20 km 时, 该劣化值上升至 0.6 dB。

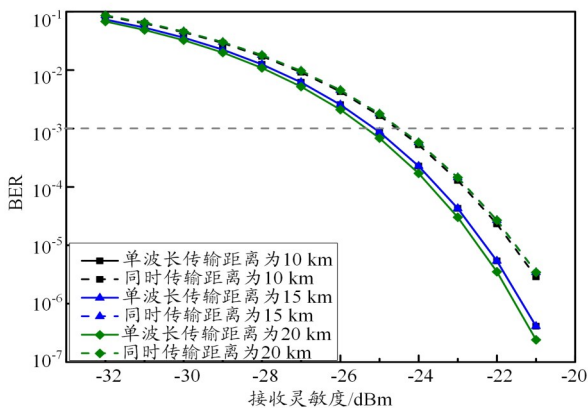
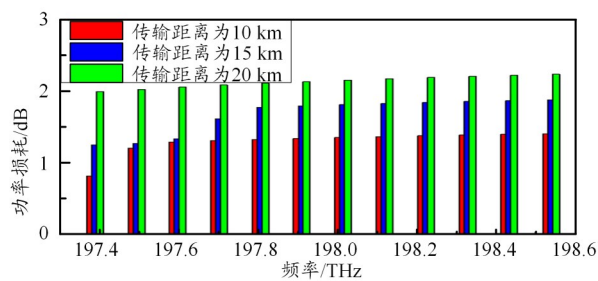


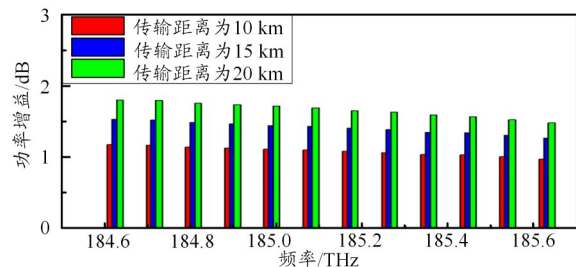
图 4 5G 前传上下行波长单独传输时信道 12 的 BER 曲线

2.1.2 5G 前传上下行波长与 NG-PON2 之间的 SRS 非线性损伤

当 5G 前传上下行波长与 NG-PON2 上下行波长共纤传输时, SRS 非线性效应所引起的功率变化如图 5 所示。在此多系统共传场景下, SRS 非线性效应显著加剧, 其原因在于 SRS 引起的功率转移效应与共传信道总数密切相关。随着更多波长 (如 NG-PON2 上下行信道) 的引入, 高频信号的能量更多地向低频信号转移, 导致高频信号经历更大的功率衰减, 即 SRS 非线性效应的强度随信道数的增加而增强。从图 5(a) 可以看出, 在传输距离为 10 km 时, 5G 前传上行波长信道 12 的功率损耗达到 1.4 dB, 较仅传输 5G 前传波长时



(a) 上行



(b) 下行

图 5 5G 前传波长与 NG-PON2 同时传输时, SRS 非线性损伤引起的 5G 前传波长功率变化

增加 0.6 dB; 当传输距离延长至 20 km 时, 其功率损耗进一步增至 2.2 dB, 增量达 0.9 dB。与此同时, 从图 5(b) 可以看出, 5G 前传下行波长信道 1 在 20 km 传输后获得 1.8 dB 的功率增益, 体现了 SRS 引起的能量再分配特征。

在 5G 前传与 NG-PON2 系统共传条件下, 5G 前传上行信道 12 的 BER 性能曲线如图 6 所示。可以看出, 当传输距离从 10 km 增至 20 km 时, 接收灵敏度劣化了 0.7 dB (相比仅 5G 前传波长传输时高出 0.1 dB)。该结果进一步验证了 SRS 非线性串扰的强度与共传信道数相关, 信道数越多, 串扰影响越显著, 从而导致更大的系统性能退化。

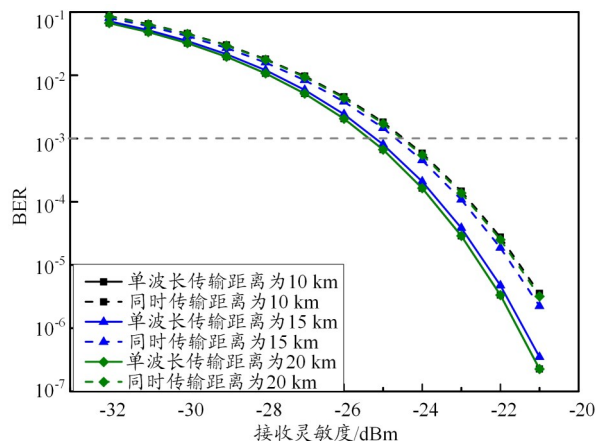


图 6 5G 前传波长与 NG-PON2 同时传输时信道 12 的 BER 曲线

2.1.3 5G 前传上下行波长与 NG-PON2、Super-PON、XG-PON1 之间的 SRS 非线性损伤

当 5G 前传上下行波长与 NG-PON2、Super-PON 及 XG-PON1 系统共纤传输 50 km 时, SRS 非线性效应所引起的功率变化如图 7 所示。从图 7(a)可以看出, 5G 前传上行波长信道 12 的功率损耗高达 10.1 dB, 相较于仅与 NG-PON2 系统共传的场景, 其损耗增加 7.9 dB。如此显著的功率衰减将严重威胁 5G 前传系统的链路预算, 对系统设计和功率管理提出严峻挑战。从图 7(b)可以看出, 在相同传输条件下, 5G 前传下行波长信道 1 获得了 5.4 dB 的功率增益, 进一步印证了 SRS 效应中能量由高频信道向低频信道转移的基本特征。该结果表明, 在多系统密集共传的光纤接入网络中, SRS 非线性效应已成为影响信号功率均衡和系统性能的关键因素。

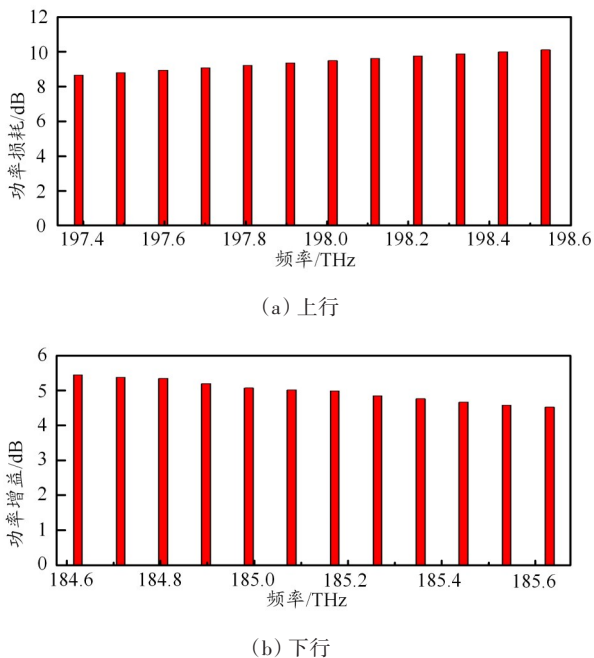


图7 5G 前传波长与 NG-PON2、Super-PON、XG-PON1 同时传输 50 km 时, SRS 非线性损伤引起的 5G 前传波长功率变化

在上述相同共纤传输条件下, 采用色散补偿光纤进行色散管理, 得到 5G 前传上行波长信道 12 的 BER 曲线如图 8 所示。可以看出, 在经过 50 km 光纤传输后, 信道 12 的 BER 曲线仍未达到 1×10^{-3} 的接收阈值 (对应 7% 硬判决前向纠错^[36])。因此, 无法准确确定其接收灵敏度, 亦无法量化具体的灵敏度劣化值。该现象说明, SRS 非线性效应在此多系统密集共传场景下已导致信号质量严重退化, 其影响远超 5G 前传系统单独传输或与 NG-PON2 共传时的情况, 对接收机的检测能力构成根本性挑战, 显著制约系统的可行性和

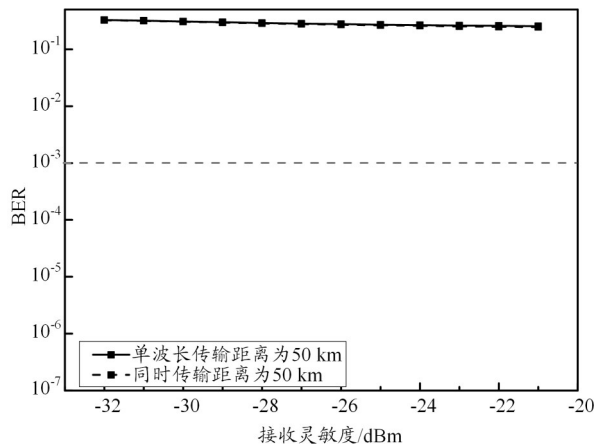


图8 5G 前传波长与 NG-PON2、Super-PON、XG-PON1 同时传输时信道 12 的 BER 曲线

传输性能。

2.2 O 波段波长分配方案条件下的 SRS 非线性损伤

当 5G 前传上下行波长采用 O 波段进行传输时, SRS 非线性效应所引起的功率变化如图 9 所示。本文分析选取了最复杂的共纤传输场景, 即 XG-PON1、GPON、50G-EPON 与 5G 前传系统上下行波长同时在光纤中传输。在此配置下, 由于 SRS 非线性效应的作用, 高频的下行波长会将部分能量转移至低频的上行波长。为评估该效应的影响, 选取 5G 前传下行波长中信道 12 (237.9 THz, 为所涉波长中频率最高者) 和上行波长中信道 1 (220.4 THz, 频率最低者) 作为典型样例,

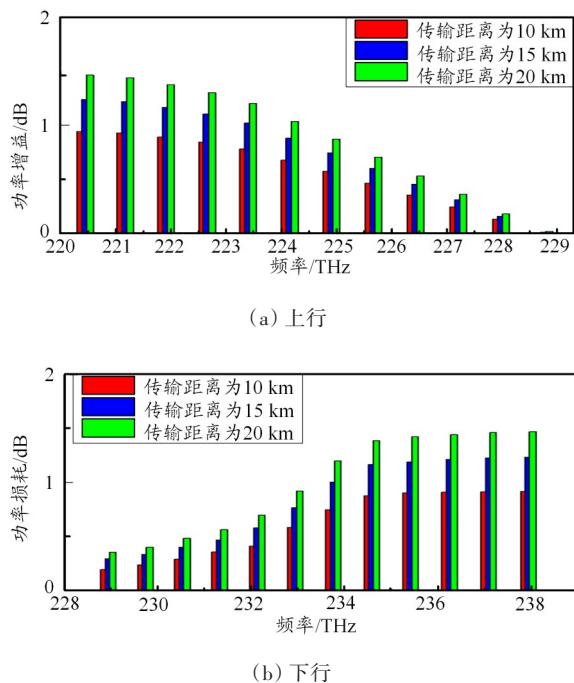


图9 5G 前传上下行波长采用 O 波段波长进行传输时, SRS 非线性损伤引起的 5G 前传波长功率变化

许岩,许亮,李振,等:基于WDM-PON架构的5G前传网络中SRS效应分析

分别研究其功率损耗与增益特性。从图9可以看出,当传输距离为20 km时,信道1对应的功率增益为1.5 dB、信道12因SRS非线性效应导致的功率损耗亦为1.5 dB,该结果表明,在O波段多系统共传环境下,SRS引起的能量转移效应显著,且在所选信道间呈现出近似对称的功率再分配特征,需在系统设计中引入相应的功率均衡与非线性补偿机制以保障链路性能。

5G前传下行信道12在经过10、15、20 km光纤传输后的BER曲线如图10所示。可以看出,当该信道在单波长传输条件下进行20 km传输时,其接收灵敏度为-25.4 dBm;而在与XG-PON1、GPON及50G-EPON系统共纤传输的场景下,相同距离的接收灵敏度退化至-24.9 dBm。由此可得,SRS非线性效应导致的灵敏度损失为0.5 dB。该退化源于高频下行信道与相邻波长间因SRS引起的功率转移,验证了多系统共传环境下SRS效应对系统性能的不利影响。

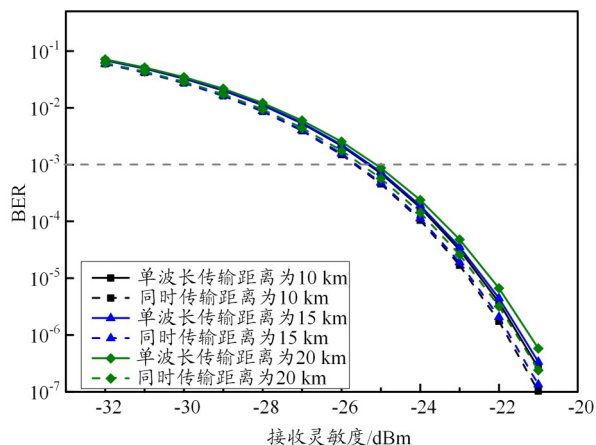


图10 5G前传波长与XG-PON1、GPON、50G-EPON同时传输时信道12的BER曲线

3 结束语

本文研究了在C波段与O波段2种波长分配方案下,基于WDM-PON架构的5G前传网络中SRS非线性效应所引发的功率变化与灵敏度劣化。在C波段波长配置中,当5G前传上下行波长独立传输时,SRS非线性效应引起的功率损耗为1.3 dB,对应的灵敏度劣化为0.6 dB。然而,在未来固定网与移动网络融合的光接入场景中,5G前传波长需与NG-PON2、Super-PON及XG-PON1等系统共纤传输,此时SRS效应显著增强,导致5G前传上行高频信道的功率损耗高达10.1 dB,系统BER性能严重退化,无法收敛至 1×10^{-3} 阈值,灵敏度劣化程度已超出可量化范围。相比之

下,在O波段波长分配方案下,尽管同样存在多系统共传的复杂环境,但SRS非线性效应引起的最大功率损耗与灵敏度劣化分别被抑制在1.5 dB和0.5 dB以内。该结果表明,O波段因具有较低的拉曼增益效率和更宽的波长间隔特性,对SRS非线性效应具备更强的抑制能力。

综上所述,相较于C波段,O波段在多业务共纤传输的5G前传场景中展现出更优的非线性容忍度,有助于缓解SRS引起的功率再分配与系统性能退化。本文研究结果可为5G前传网络中波长资源规划与系统部署提供理论依据与技术参考。

参考文献:

- [1] WANG S, RUIZ M, VELASCO L. Context-based e2e autonomous operation in B5G networks[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1625-1-1625-23.
- [2] HOLMA H, KALYANASUNDARAM S, VENKATESAN V. 5G technology: 3GPP evolution to 5G - advanced, fourth edition[M]. Hoboken: Wiley, 2024.
- [3] HUA WEI. Global industry vision 2025[EB/OL]. (2018-04-17)[2024-11-06]. <https://www.huawei.com/cn/news/2018/4/Huawei-Global-Industry-Vision-2025>.
- [4] ZHANG C, WANG X, WANG Y, et al. ENCG-DRL for multicast service oriented energy-efficient DU-CU deployment and RMSA in EON-enabled RAN[J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 88: 103958-1-103958-12.
- [5] WEI R, LUO X. Exploration 5G fronthaul technology & networking solutions[C]//IEEE. *Proceedings of 2024 International Conference on Electrical Drives, Power Electronics & Engineering (EDPEE)*. Piscataway: IEEE, 2024: 522-524.
- [6] FAYAD A, CINKLER T, RAK J. Toward 6G optical fronthaul: a survey on enabling technologies and research perspectives[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials (Early Access)*, 2025, 27(1): 629-666.
- [7] VERMA D, GARG A. Analysis with gain and power for better coverage of FTTH network using WDM-PON architecture[J]. *Journal of Optics*, 2023, 52: 1903-1911.
- [8] CHEN Z, LIANG Z, WU J, et al. Cost-effective 40-Gbaud THP PS-PAM-4 C-band IM/DD transmission for 50-km inter-DCI utilizing 2-bit DAC[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(3): 7201207-1-7201207-7.
- [9] LI J, HE H, HU W. Power depletion and crosstalk induced by stimulated Raman scattering in WDM fronthaul[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(10): 1069-1072.
- [10] RODRIGUES F, RODRIGUES C, SANTOS J, et al. Photonic integrated circuits for passive optical networks: outlook and case study of integrated quasi-coherent receiver[J]. *Photonics*, 2023, 10(2): 182-182.
- [11] LIEM A, HWANG I, GANESAN E, et al. A novel temporal dynamic wavelength bandwidth allocation based on long-short-term-memory in NG-EPON[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 82095-82107.
- [12] FAYAD A, CINKLER T, RAK J, et al. Cost-efficient optical fronthaul architectures for 5G and future 6G networks[C]//IEEE. *Proceedings of*

- 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Piscataway: IEEE, 2022: 249–254.
- [13] GAUDINO R, CURRI V, CAPRIATA S. Propagation impairments due to Raman effect on the coexistence of GPON, XG-PON, RF-video and TWDM-PON[C]//IEEE. Proceedings of the 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE, 2013: 1675-1–1675-3.
- [14] CURRI V, CAPRIATA S, GAUDINO R. Outage probability due to stimulated Raman scattering in GPON and TWDM-PON coexistence[C]//IEEE. Proceedings of the 2014 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2014: M3I.2-1–M3I.2-3.
- [15] 李军. 支持无线前传无源光网络的光纤非线性损伤研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [16] XU Y, YU P, YE N, et al. Simulation investigation of XPM and SRS effect on upgraded super-PON systems[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67: 102727-1–102727-7.
- [17] XU Y, SALEEM A. Investigation of stimulated Raman scattering effect on designing of NG-EPON systems[J]. Optical Engineering, 2021, 60(12): 126101-1–126101-9.
- [18] DESANTI C, DU L, GUARIN J, et al. Super-PON: an evolution for access networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(10): D66–D77.
- [19] MAES J, BIDKAR S, STRAUB M, et al. Efficient transport of eC-PRI fronthaul over PON[C]//IEEE. Proceedings of the 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2023: W4F.5-1–W4F.5-4.
- [20] SEKI K, YAMAGUCHI Y, KANNO A, et al. Suppression of third-order harmonics in two-tone signals using cascaded Mach-Zehnder modulators[C]//IEEE. Proceedings of the Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP) 2014 International Topical Meeting. Piscataway: IEEE, 2014: 157–159.
- [21] KOVACS I, FARUK M, WONFOR A, et al. 200 Gb/s/λ bidirectional coherent PON Solutions demonstrated over field installed fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(17): 1089–1092.
- [22] JEONG S. Silicon-nanowire-based 100-GHz-spaced 16λ DWDM, 800-GHz-spaced 8λ LR-8, and 20-nm-spaced 4λ CWDM optical demultiplexers for high-density interconnects in datacenters[J]. Photonics, 2024, 11(4): 336-1–336-19.
- [23] HWANG I, RANTO A, KHARGA R, et al. Global P2P bittorrent real-time traffic over SDN-based local-aware NG-PON2[J]. IEEE Access, 2022, 10: 76884–76894.
- [24] RADEMACHER G, LUIS R, PUTTNAM B, et al. 1.53 peta-bit/s C-band transmission in a 55-mode fiber[C]//IEEE. Proceedings of the 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE, 2022: Th3C.3-1–Th3C.3-4.
- [25] WANG Y, CALABRETTA N. Polarization-insensitive 40-channel 100-GHz spacing fold-back planar echelle grating mux/demux for photonic integrated wavelength-selective switches[J]. Optics Letters, 2022, 47(20): 5268–5271.
- [26] KOVACS I, FARUK M, SAVORY S. 200 Gb/s/λ upstream PON using polarization multiplexed PAM4 with coherent detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(18): 1014–1017.
- [27] 沈建华, 陈健, 李履信. 光纤通信系统(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [28] Beijing Lightsensing Technologies Ltd. 200 μm InGaAs M=30 Avalanche photodiode 钢镓砷雪崩光电探测器二极管[EB/OL]. [2024-11-06]. <http://www.lightsensing.com/product268.html>.
- [29] SIVARAJAN R, JEYACHITRA R. Analysis of dispersion compensation using fiber Bragg grating with generalized n^{th} root and n^{th} order polynomial chirping profile with apodization[C]//IEEE. Proceedings of the 2024 Third International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT). Piscataway: IEEE, 2024: 10718560-1–10718560-6.
- [30] SCHOU C, PELUSI M, MATSUMOTO R, et al. Optimization of un-repeated transmission using DCF-based pre-distortion and optical phase conjugation[C]//IEEE. Proceedings of the 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (CLEO-PR). Piscataway: IEEE, 2024: 10676757-1–10676757-3.
- [31] LIU X, FAN Q. Inter-channel FWM mitigation techniques for 800G-LR4, 1.6T-LR8, 400G-ER4 and 5G fronthaul applications based on O-band WDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(3): 1085–1094.
- [32] MAKRIS N, NTANOS A, PAPAGEORGIOPOULOS A, et al. O-band QKD link over a multiple ONT loaded carrier-grade GPON for FTTH applications[J]. Optics Express, 2024, 32(16): 28383–28389.
- [33] GAO S, CHEN H, SUN Y. Truncated anti-resonant hollow-core fiber for reduced microstructure diameter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(17): 6077–6082.
- [34] LIN H, JIN T, ZHANG J, et al. Paired-subcarrier equalization for phase noise and transmitter IQ skew in digital subcarrier multiplexing system[J]. Optics Express, 2023, 31(25): 41178–41190.
- [35] CHRISTODOULIDES D, JANDER R. Evolution of stimulated Raman crosstalk in wavelength division multiplexed systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1722–1724.
- [36] MAEKAWA K, YOSHIOKA T, NAKASHITA T, et al. Single-carrier 220-Gbit/s sub-THz wireless transmission over 214 m using a photonics-based system[J]. Optics Letters, 2024, 49(16): 4666–4668.