

Super-PON 系统中 SRS 串扰的仿真分析

于培华, 李正璇*, 许岩, 宋英雄

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要 超无源光网络(Super-PON)凭借低成本、长距离传输、支持大量用户等优点逐渐成为研究热点。然而,在多波长长距离传输系统中,Super-PON 上下行之间及 Super-PON 与以太网无源光网络(EPON)、10G 以太网无源光网络(10G-EPON)系统共存时,皆面临着受激拉曼散射(SRS)串扰的挑战。因此,为了满足 Super-PON 系统的高链路预算需求,通过 VPI 仿真软件分别测量了在上述各种组合方式下系统所受到的 SRS 串扰。结果表明:将 C 波段作为下行并将 L 波段作为上行进行传输时,信号所受到的功率损伤最小,为 0.43 dB(上下行单波长入射光功率分别为 10 dBm 和 13 dBm),因此这是 Super-PON 系统的最佳波段分配方案。此外,当 Super-PON 与 EPON 上行、10G-EPON 下行系统共存时,SRS 效应给它们带来的影响很小,基本可以忽略不计。

关键词 光通信; 受激拉曼散射; 超无源光网络; 以太网无源光网络; 功率损伤

中图分类号 O437.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0306003

1 引言

无源光网络(PON)目前已被广泛应用于接入网,其中以太网无源光网络(EPON)和 10G 以太网无源光网络(10G-EPON)具有良好的可扩展性、简单性、多播便利性以及可提供全业务接入等优势,被大规模部署以及量产商用^[1-3]。随着传输距离和用户数量的急剧上升,EPON 和 10G-EPON 技术为了满足需求,自身部署成本大幅度增加。此时,超无源光网络(Super-PON)凭借长距离传输、低成本部署和低延迟等优点脱颖而出^[4]。研究者制定了 Super-PON 物理层标准^[5-6]。在 Super-PON 系统中,每个中心局(CO)能够服务较大的区域和较多的用户,覆盖范围扩大至 50 km,从而大大简化了底层的物理基础设施,进一步减少了为大片区域提供服务所需的电力站点数量^[7-8]。

Super-PON 的重点并非提升传输速率,而是扩展 PON 的空间特性,因此其单波长传输速率依然为 10 Gbit/s。同时,Super-PON 的波长被规划为 O 波段和 C 波段的自由频谱范围集(FSR Set)。

每个 FSR 集包含了两个谱带(C 波段 1549.32~1561.42 nm 和 L 波段 1585.54~1597.93 nm),一个用于上行传输(US),一个用于下行传输(DS),而在每个谱带内又定义了信道间隔为 100 GHz 的 16 个信道^[9]。然而,多波长共存时可能会在馈线光纤中出现光纤非线性效应,尤其是受激拉曼散射(SRS)效应,将会降低链路的传输性能。当多个波长共同在一根光纤中传输时,SRS 效应导致能量从较短的波长转移至较长的波长^[10-11],并且功率损伤随着信道间隔的增加而增加,直至信道间隔增加至 110 nm 左右^[12]。此外,当在 1490 nm 处工作的 EPON US、1577 nm 处工作的 10G-EPON DS 与 Super-PON US/DS(FSR Set 1:L 波段 1585.54~1597.93 nm,C 波段 1549.32~1561.42 nm)链路共存时,SRS 效应的存在会降低信号的传输质量,因此为了设计具有更佳性能的 Super-PON 系统,研究 SRS 效应对系统的影响是至关重要的。

本文首先通过 VPI 仿真软件分别研究了 US 采用 C 波段和 DS 采用 L 波段、US 采用 L 波段和 DS 采用 C 波段时,单波长传输速率为 10 Gbit/s 的

收稿日期: 2021-05-13; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-06-18

基金项目: 上海市科委基金(20511102400, 20ZR1420900)、111 项目基金(D20031)

通信作者: *zhengxuanli@shu.edu.cn

16 个波长传输系统采用非归零码(NRZ)信号,该信号经过 50 km 标准单模光纤(SSMF)传输后会产生 SRS 串扰。仿真结果显示,将 C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 时,信号所受到的功率损伤最小,因此这是 Super-PON 系统中最优的波段分配方案。而后我们分别仿真了 Super-PON US、Super-PON DS 与 EPON US、10G-EPON DS 共存时,系统所受到的 SRS 损伤。结果表明:在斯托克斯光入射光功率为 13 dBm 的情况下,当 Super-PON DS 和 10G-EPON DS 共同传输时,SRS 效应对 Super-PON 系统所造成的功率损伤最大,为 0.31 dB;当 Super-PON DS 与 EPON US 在 50 km SSMF 中共同传输时,EPON 系统所受到的功率损伤最高,为 0.85 dB。

2 受激拉曼散射的基本原理

拉曼散射是一种非线性效应,其过程可用量子力学描述,即一个光子被介质分子散射成另一个低频光子,同时分子完成两个振动态之间的跃迁^[13]。当泵浦光通过受激拉曼散射将能量转移至斯托克斯光时,拉曼增益系数 g_R 作为拉曼散射过程中的一项重要参数,决定了斯托克斯光功率的增长趋势^[14],其可表达为

$$\frac{dI_S}{dz} = g_R(\Omega)I_P I_S, \quad (1)$$

式中: I_P 和 I_S 分别表示泵浦光和斯托克斯光的光强; $\Omega \equiv \omega_P - \omega_S$ 表示拉曼频率偏移,其中 ω_P 和 ω_S 分别表示泵浦光和斯托克斯光的频率; z 表示单模光纤的位置。

在多波长共存的系统中,经过光纤传输后,短波长信道(泵浦光)将一部分能量转移到长波长信道(斯托克斯光)上,从而引起短波长信道上的功率损耗和信道间的 SRS 串扰,这将会显著影响系统的性能和链路预算。当两束不同波长的光信号在同一根光纤中传输时,斯托克斯信号和泵浦信号之间的 SRS 损伤^[15]可以描述为

$$\frac{\partial P_S}{\partial z} + \frac{1}{v_S} \frac{\partial P_S}{\partial t} = (gP_P - \alpha)P_S, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_P}{\partial z} + \frac{1}{v_P} \frac{\partial P_P}{\partial t} = (-gP_S - \alpha)P_P, \quad (3)$$

式中: P_S 和 P_P 分别指单个斯托克斯信号和泵浦信号的入纤光功率; v_S 和 v_P 分别指斯托克斯光和泵浦光的群速度; g 指 g_R 与光纤有效截面积 A_{eff} 的比值,即 $g = g_R/A_{\text{eff}}$; α 指光纤的损耗。在短波长光波和长波长光波之间的受激拉曼散射过程中,短波长

将作为泵浦光,长波长将作为斯托克斯光,这时短波长光波的一部分能量会转移至长波长光波上,而本文研究的是泵浦信道的功率损耗,因此斯托克斯信道上的非线性拉曼增益项 $gP_P P_S$ 可以忽略^[10]。此外,为了便于分析泵浦信道的功率损耗,(2)、(3)式中的时间相关项 $\left(\frac{1}{v_S} \frac{\partial P_S}{\partial t}, \frac{1}{v_P} \frac{\partial P_P}{\partial t}\right)$ 的值相对于另一项 $(\partial P_S/\partial z, \partial P_P/\partial z)$ 要小很多,也可以忽略,因此(2)、(3)式可分别简化为

$$\frac{\partial P_S}{\partial z} = -\alpha P_S, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_P}{\partial z} = (-gP_S - \alpha)P_P. \quad (5)$$

由(4)、(5)式,我们可以进一步得到,当 N 个长波长一起传输时,由 SRS 效应所引起的短波长信道上的功率损耗^[16]为

$$\Delta P = (\lg e) \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} N P_S(0) L_{\text{eff}}, \quad (6)$$

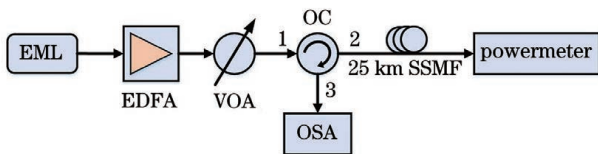
$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha, \quad (7)$$

式中: L_{eff} 指光纤的有效长度,是由光纤长度 L 和光纤的损耗 α 共同确定; $P_S(0)$ 指单个斯托克斯信号的发射光功率。通过(6)式可以推出,SRS 效应所导致的短波长功率损耗与长波长方向的波长数目、长波长信号的入纤光功率、拉曼增益系数及光纤的参数有关。

3 搭建仿真系统

3.1 受激布里渊散射效应的实验分析

受激布里渊散射(SBS)也是非线性效应的一种,与 SRS 类似,皆产生入射频率下移的斯托克斯波,从而影响系统的信号质量^[17-18]。但是,它们两者之间还存在着不同之处,例如,单模光纤中 SRS 产生的斯托克斯光向前、后两个方向传输,而 SBS 产生的斯托克斯光则仅向后传输。当信号以高输入光功率传输时,会发生频率下移(约下移 10 GHz),影响 Super-PON 系统的传输性能^[19]。为了精确地测量 SRS 串扰值,需将信号的入射光功率设为低于 SBS 效应的阈值光功率。首先通过实验测量了采用电吸收调制激光器(EML)进行传输时所产生的 SBS 效应的阈值光功率,其实验原理图如图 1 所示。在发送端,先采用一个中心波长为 1548.378 nm 的 EML 发射光源,随后将由脉冲波行发生器(PPG)输出的 25 Gbit/s NRZ 电信号调制到光载波上进行传输,然后使用掺铒光纤放大器(EDFA)与可调谐光



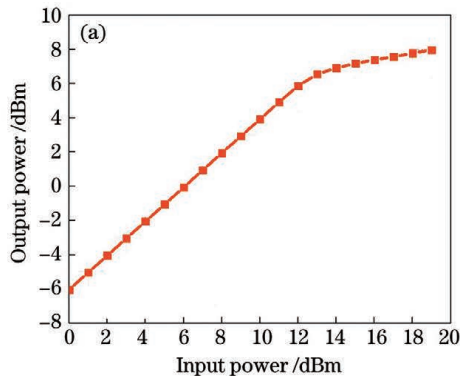
EML: electroabsorption modulation laser
 EDFA: erbium-doped fiber amplifier
 SSMF: standard single mode fiber
 VOA: variable optical attenuator
 OSA: optical spectrum analyzer
 OC: optical circulator

图 1 测量 SBS 阈值光功率的实验原理图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for measuring threshold optical power of SBS

衰减器 (VOA) 对在 25 km SSMF 中传输的光功率进行调节 (调节范围为 0~19 dBm)。信号在光纤中传输前, 再采用一个光环形器 (OC) 将传输信号分离为正向和反向信号。最后在 OC 端口 2 处 (正向) 连接光功率计并采集随着输入光功率变化的输出光功率, 同时在端口 3 处 (反向) 接入光谱分析仪 (OSA) 并记录在不同输入光功率下反向传输的光谱。实验中参数的设置如表 1 所示。

实验结果显示, 当输入光功率在 0~13 dBm 区



Parameter	Content
Wavelength / nm	1548.378
Modulation format	NRZ
Data rate / (Gbit·s ⁻¹)	25
Fiber length / km	25
Launched power / dBm	0-19

间变化时, 输出与输入光功率呈线性增长的关系; 当输入光功率大于 13 dBm 时, 输出与输入呈缓慢增长的非线性关系, 这表明此时传输系统中已经引入了 SBS 串扰, 如图 2(a) 所示。此外, 我们还采用 OC 观测了当入纤光功率分别为 11 dBm、12 dBm、13 dBm、14 dBm 和 15 dBm 时信号的反向传输光谱, 发现约在 1548.468 nm 处产生了斯托克斯光, 如图 2(b) 所示。由于产生的斯托克斯光的幅度越高, SBS 效应对传输系统所造成的影响越严重, 因此得出采用 EML 进行传输的 SBS 效应的阈值光功率为 13 dBm。

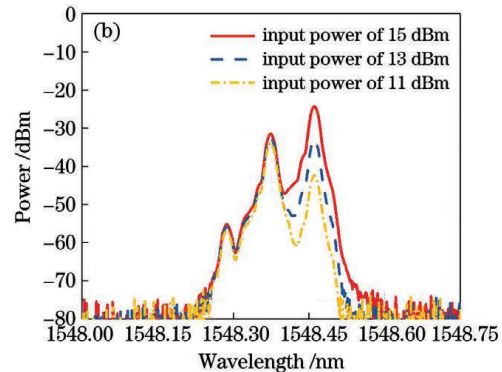


图 2 测量的经过 25 km SSMF 传输的 SBS 阈值光功率。(a) 输出与输入光功率的关系曲线; (b) 不同输入光功率下的反向传输光谱

Fig. 2 Measured threshold optical power of SBS after 25 km SSMF transmission. (a) Relationship between output and input powers; (b) reverse transmission spectra under different input optical powers

3.2 SRS 串扰的仿真研究

在 Super-PON 传输系统中, US 和 DS 波长总数目为 32, 由于实验条件限制, 本文通过 VPI 仿真软件, 分别测量了 C 波段作为 US 和 L 波段作为 DS、C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 时信号所受到的 SRS 效应的影响, 仿真结构如图 3 所示。在 DS 的发送端 (Tx), 首先采用 16 个 EML 发射 10 Gbit/s NRZ 信号, 每个激光器的光功率和消光比分别设置为 -2.5 dBm 和 10 dB, 其次分别经过偏振控制器 (PC) 以确保每个信号的偏振状态保持

一致, 然后通过一个损耗为 5.5 dB 的波分复用器 (Multiplexer) 将 16 路信号耦合在一起, 最后采用一个增益为 21 dB 的 EDFA 对信号的光功率进行放大并将其送入 50 km 馈线光纤中进行传输 ($\alpha = 0.24$ dB/km)。在接收端 (Rx), 使用损耗为 4 dB 的周期性波导阵列光栅 (CAWG) 分解出光信号, 并将其送入不同的接收机中计算每个信道的误码率 (BER, B_{ER})。为了绘制连续的 BER 曲线, 使用 VOA 调节进入雪崩光电二极管 (APD) 接收机的接收光功率。

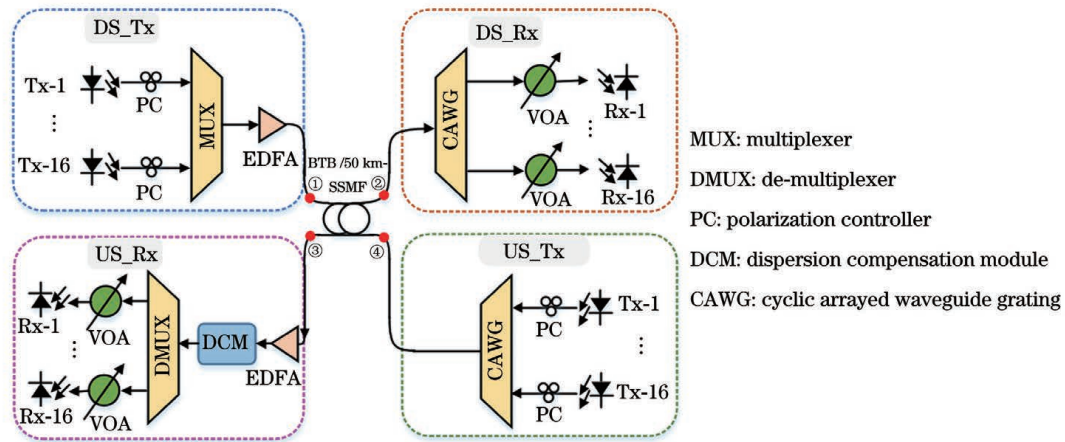


图 3 Super-PON US 和 DS 的仿真结构图

Fig. 3 Structural diagram of simulation of Super-PON US and DS

在 US 的光网络单元 (ONU) 侧, 首先采用 16 个 EML 发射光功率为 4 dBm 的光信号与 PC 连接, 然后采用 CAWG 将信号耦合在一起并送入 50 km SSMF 中进行传输。在光线路终端 (OLT) 侧, 首先传输后的信号通过具有 25 dB 增益的 EDFA 进行放大, 然后将其送入色散补偿模块 (DCM) 中进行色散补偿, 最后采用解复用器 (De-multiplexer) 将 US 信号进行分离并送入不同的接收机中计算其 BER。仿真中所采用的 C 和 L 波段

的波长是目前协议分配的 FSR Set 1, 如表 2 所示。值得注意的是, 在图 3 中①、②、③和④标记处, 我们放置了信号分析仪以观察经过背靠背 (BTB) 和 50 km SSMF 传输后的光谱, 这样便于计算信号的功率损伤。在实际应用中, 为了支持 1024 个用户接入, 信号在到达 ONU 之前需采用 1:64 分光器, 其损耗为 20.5 dB, 但是在仿真中, 为了便于研究, 我们采用了一个具有相同损耗的衰减器来代替。

表 2 FSR Set 1 的波长分配

Table 2 Wavelength assignment of FSR Set 1

Channel	L-band		C-band	
	Frequency /THz	Wavelength /nm	Frequency /THz	Wavelength /nm
1	187.613	1597.93	192.000	1561.42
2	187.711	1597.10	192.100	1560.61
3	187.809	1596.27	192.200	1559.79
4	187.906	1595.44	192.300	1558.98
5	188.004	1594.61	192.400	1558.17
6	188.102	1593.78	192.500	1557.36
7	188.200	1592.95	192.600	1556.56
8	188.297	1592.12	192.700	1555.75
9	188.395	1591.30	192.800	1554.94
10	188.493	1590.47	192.900	1554.13
11	188.590	1589.65	193.000	1553.33
12	188.688	1588.83	193.100	1552.52
13	188.786	1588.00	193.200	1551.72
14	188.883	1587.18	193.300	1550.92
15	188.981	1586.36	193.400	1550.12
16	189.079	1585.54	193.500	1549.32

此外,当 Super-PON 与 EPON US、10G-EPON DS 系统共存时,波长分配如图 4 所示。由于信道间隔落在了 SRS 增益谱的范围内,因此将会导致 SRS 串扰对系统产生不利影响。根据协议中规定的参数:EPON US 的传输速率和光功率分别为 1 Gbit/s

和 0 dBm,10G-EPON DS 的传输速率和光功率分别为 10 Gbit/s 和 5 dBm,我们通过仿真还测量了 EPON US 与 Super-PON US、EPON US 与 Super-PON DS、10G-EPON DS 与 Super-PON US、10G-EPON DS 与 Super-PON DS 之间的 SRS 损伤。

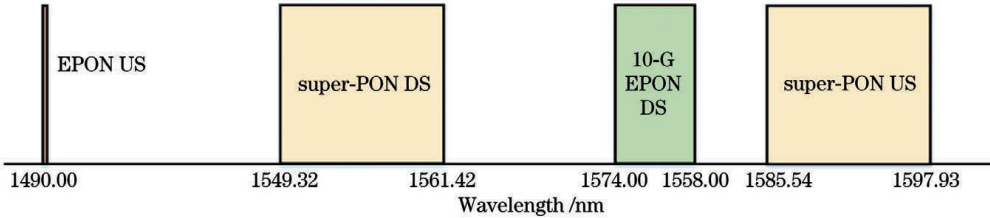


图 4 Super-PON、EPON 和 10G-EPON 系统的波长分配

Fig. 4 Wavelength assignment of Super-PON, EPON and 10G-EPON systems

4 仿真结果分析

4.1 Super-PON US 与 DS 之间的 SRS 串扰

首先,我们分析了当 C 波段作为 US 和 L 波段作为 DS 时 Super-PON 系统所受到的 SRS 损伤。由 SRS 原理可知,SRS 串扰与长波长的入射光功率相关,因此固定 US(泵浦光)信号的单波长光功率为 4 dBm,同时将 DS 信号的单波长光功率从 4 dBm 逐渐增加至 13 dBm,得到的 US 和 DS 信号的功率损伤如图 5(a)所示。可以看出,SRS 效应对 US 和 DS 信号所造成的功率损伤会随着斯托克斯

光的人射光功率的增加而增加,并且 US 信道的功率损伤总是高于 DS 信道,特别在 DS 信号入射光功率为 13 dBm 时,US 和 DS 信道所受到的最大功率损伤分别为 2.94 dB 和 0.73 dB。产生此现象的原因是短波长的能量向长波长转移,且 US、DS 波长之间也存在着 SRS 串扰。图 5(b)所示是 US 和 DS 信道的单波长输入光功率分别为 4 dBm 和 13 dBm 时,US 和 DS 中每个信道所受到的功率损伤。值得注意的是,功率损伤是指经过 50 km SSMF 传输后,考虑 SRS 效应时与不考虑 SRS 效应时信号光功率的差值。

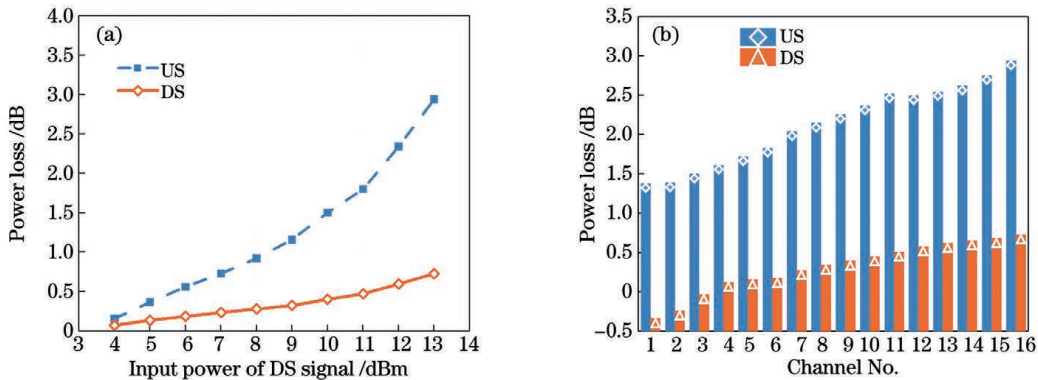


图 5 C 波段作为 US 和 L 波段作为 DS 时信号的功率损伤。(a)在不同的 DS 光功率下;(b)当 DS 和 US 光功率分别为 13 dBm 和 4 dBm 时

Fig. 5 Power losses of signal for C-band as US and L-band as DS. (a) Under different DS optical powers; (b) under DS optical power of 13 dBm and US optical power of 4 dBm

然后,我们进一步分析了在 C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 时信号所受到的 SRS 损伤,DS 信道的单波长光功率固定为 13 dBm,US 信道的单波长光功率从 4 dBm 改变至 10 dBm,其 US 和 DS 信号的功率损伤如图 6(a)所示。可以明显地观察到 US 信号的功率损伤为负值,即 DS 信道的光功率转移

至 US 信道上,导致 US 信号经过光纤传输后功率增加。与 C 波段作为 US 和 L 波段作为 DS 的方案相比,之所以产生此现象,是因为信号在馈线光纤中传输时,US 信号在到达馈线光纤之前已经通过分光器和 CAWG,DS 信号的功率比 US 信号的功率大 20 dB 以上,所以 US 信道的 SRS 串扰可以忽略。

相反,DS 信道的 SRS 损伤是显著的,当斯托克斯光的输入光功率为 10 dBm 时,DS 信号的最大功率损伤为 0.43 dB,而此时的损伤是可以通过增加 DS 中 EDFA 的增益和最大光功率来解决。此外,我们还分析了当 DS 和 US 信道的单波长输入光功

率分别为 13 dBm 和 10 dBm 时每个信道所受到功率损伤,结果如图 6(b)所示。因此,对于需要满足 41 dB 链路预算的 Super-PON 系统来说,将 C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 进行传输是最优的选择。

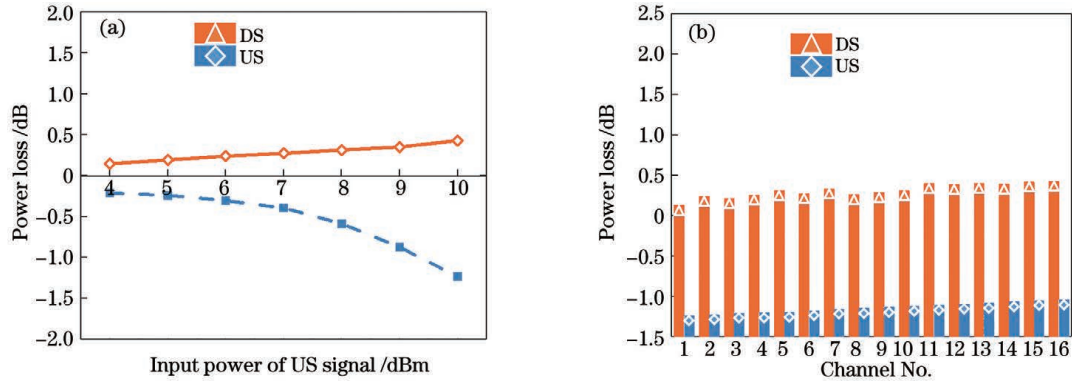


图 6 C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 时信号的功率损伤。(a)在不同的 US 光功率下;(b)当 DS 和 US 光功率分别为 13 dBm 和 10 dBm 时

Fig. 6 Power losses of signal for C-band as DS and L-band as US. (a) Under different US input powers; (b) under DS optical power of 13 dBm and US optical power of 10 dBm

此外,在 DS 采用 C 波段和 US 采用 L 波段的组合方式下,我们还分别分析了在考虑 SRS 效应时与不考虑 SRS 效应时信号的 BER 性能。由于 SRS 效应会随着信道间隔的增加而增加,因此我们以 C 波段中最短的波长即第 16 个信道(Ch-16)波长(193.5 THz)、L 波段中最长的波长即第 1 个信道(Ch-1)波长(187.613 THz)为例进行详细分析,如图 7 所示。图 7(a)是指在上述组合方式下,DS 中 Ch-16 的 BER 与接收光功率之间的关系曲线,发现

在以 $B_{ER} = 1.0 \times 10^{-2}$ 为前向纠错码(FEC)门限且 US 单波长光功率为 4 dBm 时,SRS 串扰引起的灵敏度损伤约为 0.3 dB,此时接收灵敏度可达 -28 dBm (满足 41 dB 链路预算)。图 7(b)是 US 中 Ch-1 的 BER 性能曲线,发现经过 50 km SSMF 传输后,信号的 BER 性能有所改善,而产生此现象的原因是 SRS 效应导致 DS 信号的光功率转移到 US 信号上。上述结果的分析再次证明了 DS 采用 C 波段和 US 采用 L 波段是 Super-PON 系统中的最佳方案。

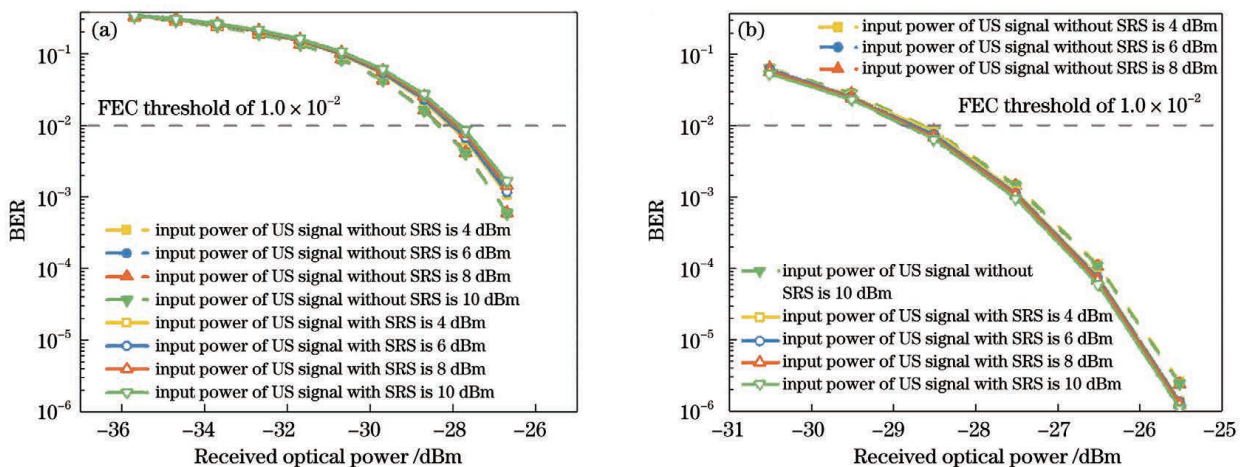


图 7 BER 与接收光功率之间的关系曲线。(a)DS 的 Ch-16;(b)US 的 Ch-1

Fig. 7 Relationship between BER and received optical power. (a) Ch-16 of DS; (b) Ch-1 of US

4.2 Super-PON 与 EPON、10G-EPON 之间的 SRS 串扰

当 Super-PON 系统将 C 波段作为 DS 和 L 波段

作为 US 时,我们首先分析了 Super-PON US 与 10G-EPON DS 之间的 SRS 损伤,如图 8(a)所示,明显地观察到 10G-EPON DS 信号所受到的功率损伤很小,

即便将斯托克斯光(Super-PON US)的入射光功率增加至 13 dBm,其所受到的功率损伤仅为 0.0098 dB。然后,又分析了在 EPON US 与 Super-PON US 共同传输时系统所受到的功率损伤,如图 8(b)所示,当 Super-PON US 单波长入纤光功率为 13 dBm 时,

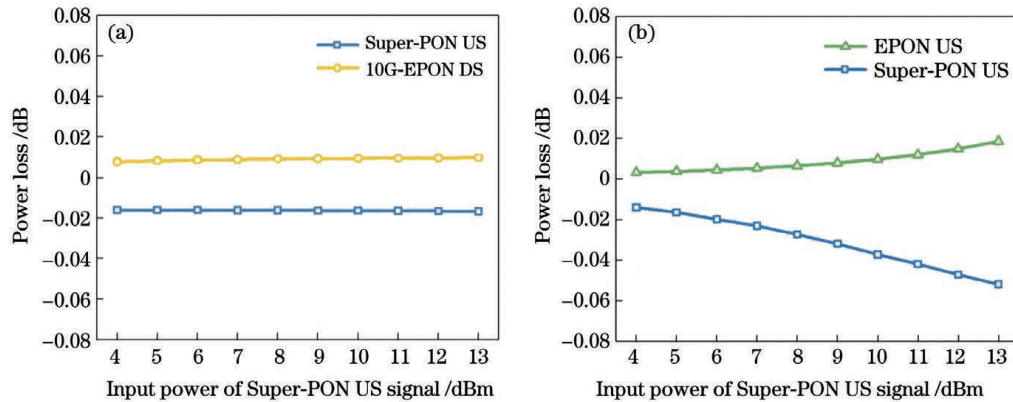


图 8 不同 PON 组合下信号的功率损伤。(a)Super-PON US 与 10G-EPON DS;(b)Super-PON US 与 EPON US

Fig. 8 Power losses of signal under different PON combinations. (a) Super-PON US and 10G-EPON DS; (b) Super-PON US and EPON US

此外,通过仿真还测量了 Super-PON DS 与 EPON US 信号共同在 50 km SSMF 中传输时,系统所受到的 SRS 串扰值,如图 9(a)所示,结果表明,当斯托克斯光(Super-PON DS)发射光功率为 13 dBm 时,SRS 串扰对 EPON US 系统造成了 0.85 dB 的功率损伤,但是 EPON 系统的传输距离一般为 20 km,因此在此组合中 SRS 串扰对系统所

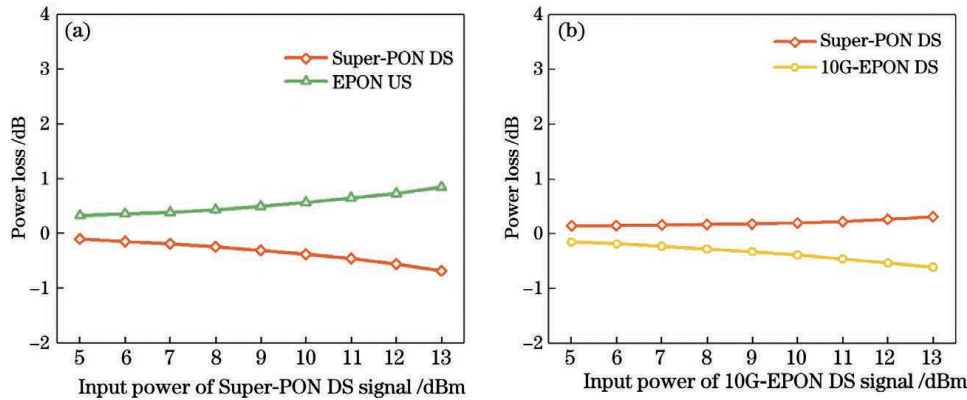


图 9 不同 PON 组合下信号的功率损伤。(a)Super-PON DS 与 EPON US;(b)Super-PON DS 与 10G-EPON DS

Fig. 9 Power losses of signal under different PON combinations. (a) Super-PON DS and EPON US; (b) Super-PON DS and 10G-EPON DS

5 结 论

为了验证 Super-PON 系统的传输性能,研究了 SRS 串扰对其所产生的影响。通过仿真研究了在 US 采用 C 波段和 DS 采用 L 波段、US 采用 L 波段

EPON US 所受到的功率损伤为 0.0186 dB。之所以产生这些现象,是因为 Super-PON US 信号在进入馈线光纤之前经过了一个光分路器,实际进入光纤的光功率较小。因此在上述两种组合方式下,SRS 效应对系统所造成的损伤都可以忽略不计。

造成的损伤较低,基本可以忽略不计。最后,我们测量了 Super-PON DS 与 10G-EPON DS 信号共同在光纤中传输时系统的 SRS 损伤,其结果如图 9(b)所示,发现信号的功率损伤随着斯托克斯光(10G-EPON DS)的入射光功率的增加而增加,且当入射光功率为 13 dBm 时,SRS 效应对 Super-PON DS 信号造成的最大功率损伤为 0.31 dB。

和 DS 采用 C 波段两种不同组合方式下,SRS 串扰对 Super-PON 系统所产生的影响。仿真结果表明:当 C 波段作为 DS 和 L 波段作为 US 时,信号所受到的功率损伤最小,为 0.43 dB(US 和 DS 的单波长入射光功率分别为 10 dBm 和 13 dBm),因此该组合方式是 Super-PON 系统的最佳方案。此外,通过

仿真分别测量了 Super-PON US/DS 与 EPON US、10G-EPON DS 共同传输时所造成的 SRS 串扰,结果显示,SRS 效应对这些系统所带来的影响可以忽略不计。

参 考 文 献

- [1] Kramer G, Pesavento G. Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 66-73.
- [2] Tanaka K, Agata A, Horiuchi Y. IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 651-661.
- [3] Kramer G. 10G-EPON: drivers, challenges, and solutions[C]//2009 35th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 2009, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 2009: 1-3.
- [4] Du L B, Zhao X J, Yin S, et al. Long-reach wavelength-routed TWDM PON: technology and deployment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 688-697.
- [5] Desanti C, Du L, Lam C F, et al. Super-PON[EB/OL]. [2021-05-10]. http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngrates/public/18_01/desanti_nea_01a_0118.pdf.
- [6] Desanti C. Specifying Super-PON[EB/OL]. [2021-05-10]. http://www.ieee802.org/3/cs/public/201903/20190312-Specifying_Super-PON.pdf.
- [7] Du L B, Lam C F. Super-PON: technology and standards for simplifying FTTH deployment [C]//OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF), July 13-16, 2020, Washington, D. C. Washington, D.C.: OSA, 2020: NeTu2B.1.
- [8] DeSanti C, Du L, Guarin J, et al. Super-PON: an evolution for access networks [Invited] [J]. IEEE/OEA Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(10): D66-D77.
- [9] Du L. Super-PON wavelengths considerations [EB/OL]. [2021-05-10]. http://www.ieee802.org/3/cs/public/201903/20190312-Super-PON_Wavelength_Considerations.pdf.
- [10] Li J, He H, Hu W S. Theoretical and experimental analysis of Inter-channel crosstalk between TWDM and fronthaul wavelengths due to stimulated Raman scattering[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8809-8817.
- [11] 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]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013: 1-3.
- [12] Shen Y R. Principles of nonlinear optics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [13] Pan W W, Zhou J Q, Zhang L, et al. Research advances in ultrafast Raman fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508016. 潘伟巍, 周佳琦, 张磊, 等. 超快拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508016.
- [14] Yin K, Xu J M, Leng J Y, et al. Research progress of high power fiber Raman lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010004. 殷科, 许将明, 冷进勇, 等. 高功率光纤拉曼激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010004.
- [15] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [16] Desurvire E, Simpson J R, Becker P C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier[J]. Optics Letters, 1987, 12(11): 888-890.
- [17] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in fiber using the tilted fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1706001. 田鑫, 赵晓帆, 王蒙, 等. 基于倾斜 FBG 的光纤受激布里渊散射抑制[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1706001.
- [18] Zheng Y, Ni Q L, Zhang L, et al. Influence of stimulated Raman scattering on propagation properties of high-power laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0701005. 郑也, 倪庆乐, 张琳, 等. 受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0701005.
- [19] Paradiso L, Boffi P, Marazzi L, et al. Electrical spectral technique for measuring cross-phase modulation impact in WDM optical systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 160-162.

Simulation Analysis of SRS Crosstalk in Super-PON System

Yu Peihua, Li Zhengxuan, Xu Yan, Song Yingxiong

Key Laboratory of Specialty Fiber and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective Super-passive optical network (Super-PON) has gradually become a hot topic due to its advantages of low cost, long-distance transmission, and supporting a large number of users. While in the multi-wavelength and long-distance transmission system, the upstream (US) and downstream (DS) of the Super-PON system which coexists with Ethernet passive optical network (EPON) and 10G-EPON systems are all confronted with the challenge of stimulated Raman scattering (SRS) effect. The SRS effect causes a transfer of energy from the shorter wavelengths (pump channels) to the longer wavelengths (Stokes channels) when multiple wavelengths are simultaneously transmitted in the standard single mode fiber (SSMF), which reduces the transmission performance of the system. Therefore, in order to satisfy the high power budget requirement of the Super-PON system, the VPI simulation software is adopted to measure the SRS crosstalk of systems under the above combinations.

Methods Due to the high input power involved, the stimulated Brillouin scattering (SBS) effect can affect the transmission performance of the Super-PON system. Firstly, in order to accurately measure the power impairment of signals caused by the SRS effect, the threshold optical power of SBS is measured by an experiment, which is 13 dBm. Second, in the Super-PON system, the total number of wavelengths of US and DS is 32. Owing to the limitation of experimental conditions, the influence of SRS effect on 10 Gbit/s non-return-to-zero (NRZ) signals through a 50 km SSMF transmission system is investigated by simulation where the following two cases are considered. The one case is using C-band for US and L-band for DS, and the other case is using C-band for DS and L-band for US. In the Super-PON system, the significant difference between US and DS transmissions is that the DS signals are first amplified by an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and then transmitted through a 50 km SSMF, while the US signals are first transmitted through a 50 km SSMF and then amplified. Finally, when the Super-PON US and DS coexist with EPON US and 10G-EPON DS systems, the power penalty of Stokes channels induced by SRS is measured.

Results and Discussions When using C-band for US and L-band for DS and setting the input optical powers of each US and DS channels to 4 dBm and 13 dBm, respectively, the maximum power impairment of US and DS signals caused by SRS is 2.94 dB and 0.73 dB, respectively (Fig. 5). At the same time, the maximum power impairment of DS signals is 0.43 dB when using C-band for DS and L-band for US and setting the input optical powers of each US and DS channels to 10 dBm and 13 dBm, respectively (Fig. 6). In addition, when the single wavelength optical power of US channel is set to 4 dBm, the sensitivity penalty of Ch-16 of DS transmission caused by SRS crosstalk is about 0.3 dB at a bit error rate (BER) of 1.0×10^{-2} , and the received optical power achieves -28 dBm, which can satisfy the 41 dB power budget [Fig. 7 (a)]. By comparison when C-band used as DS transmission and L-band used as US transmission, one can distinguish the optimal band-allocation scheme for the Super-PON system. When using C-band for DS and L-band for US in the Super-PON system, first we analyze the power impairment between Super-PON US and 10G-EPON DS, and it is obvious that the power impairment of 10G-EPON DS signals is very small. Even if the input optical power of each Super-PON US channel (Stokes channel) is increased to 13 dBm, the pump signals have the maximum power impairment of only 0.0098 dB [Fig. 8 (a)]. Second, the maximum power impairment of EPON US signals is 0.0186 dB when EPON US and Super-PON US signals are together transmitted and the input power of each Super-PON US channel is set to 13 dBm [Fig. 8 (b)]. Third, when the Super-PON DS and EPON US are transmitted through a 50 km SSMF and the input power of each Super-PON DS is configured as 13 dBm, the maximum power impairment of EPON US signals is 0.85 dB [Fig. 9 (a)]. However, the transmission distance of the EPON system is generally 20 km. Therefore, in this combination, the power impairment caused by SRS crosstalk is reduced, which can be ignored. Finally, the maximum power impairment of the Super-PON DS signals induced by SRS is 0.31 dB when the Super-PON DS and 10G-EPON DS (the input power of each 10G-EPON DS channel is set to 13 dBm) are simultaneously transmitted in the optical fiber [Fig. 9 (b)].

Conclusions In this paper, the influence of SRS crosstalk on the Super-PON system is investigated by simulation in which two cases are considered. The one case is using C-band for US and L-band for DS, and the other case is using C-band for DS and L-band for US. The simulation results show that when using C-band for DS and L-band for US, the power impairment of signals is the smallest, which is 0.43 dB (the single wavelength input optical powers of US and DS are 10 dBm and 13 dBm, respectively). Therefore, this combination mode is the best band-allocation scheme for the Super-PON system. Besides, we simulate the power impairment of signals caused by SRS when the Super-PON US and DS coexist with EPON US and 10G-EPON DS systems, and the results show that the SRS effect has little influence on them which can be basically ignored.

Key words optical communications; stimulated Raman scattering; Super-PON; ethernet passive optical network; power loss