

# DWDM 系统中 EDFA 串扰引起的误码率恶化研究

陈祥敬, 王健, 吴重庆\*

北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室光信息科学与技术研究所, 北京 100044

**摘要** 在 5G 网络中, 用户数据通过超密集基站汇集成大数据包, 这些数据包被异步交换体制的密集波分复用 (DWDM) 系统中的掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大时, 会产生信道间串扰, 导致数据包的误码率 (BER) 恶化。在测定 EDFA 增益恢复时间的基础上, 对 BER 恶化进行了深入研究。推导了串扰引起的 BER 计算公式, 讨论了影响 BER 的因素, 搭建了大数据包串扰的实验装置。理论和实验结果表明, 一个信道数据包的包长和光功率越大, 对另一个信道数据包 BER 的影响也越大, 当数据包的包长小于  $5 \mu\text{s}$  时, 串扰对 BER 的影响是可以忽略的。

**关键词** 光纤通信; 掺铒光纤放大器; 交叉增益调制; 串扰; 误码率

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1806005

## Study on Bit Error Rate Degradation Caused by EDFA Crosstalk in DWDM System

Chen Xiangjing, Wang Jian, Wu Chongqing\*

Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** In 5G networks, user data will assemble larger packets through ultra-dense base stations. When these packets are amplified by erbium-doped fiber amplifier (EDFA) in the dense wavelength division multiplexing (DWDM) system using an asynchronous switching system, interchannel crosstalk will occur and the bit error rate (BER) of the data packets will be deteriorated. Based on the measurement of gain recovery time of EDFA, the BER deterioration is studied in depth. The calculation formula of BER caused by crosstalk is derived, and the factors that influence BER are discussed. An experimental device of large data packet crosstalk is set up. Both theoretical and experimental results show that the greater the packet length and optical power of the data packet in one channel, the greater the effect on the BER of the data packet in another channel. When the packet length is less than  $5 \mu\text{s}$ , the effect of crosstalk on the BER is negligible.

**Key words** optical fiber communications; erbium-doped fiber amplifier; cross-gain modulation; crosstalk; bit error rate

**OCIS codes** 060.2330; 060.2320; 060.4080

## 1 引 言

随着数据通信的发展, 数据包 (数据分组、数据帧) 的长度从异步传输模式 (ATM) 的 53 B, 到以太网的 1.5 KB, 同步数字体系 (SDH) 的  $9 \times 270$  B, 光传送网 (OTN) 的  $4 \times 4080$  B, 再到兼容以太网和多协议标签交换-传送架构 (MPLS-TP) 的分组传送网 (PTN), 可以兼容多个长度为 9.6 KB 的异步数据包。随着移动通信 5G 技术的全面推广<sup>[1]</sup>, 为了实现 5G 网络无线基带信号的大容量、低延迟传输和

海量连接等需求<sup>[2-3]</sup>。一个 5G 无线帧的长度需要达到 10 ms, 包含两个长度为 5 ms 的半帧, 每个半帧由长度为 1 ms 的子帧组成<sup>[4]</sup>。因此, 需要对制约数据包长度的因素进行研究。

制约数据包长度的主要因素是通信系统有效性和可靠性的折中, 数据包长度越短, 由单个比特误码引起整个数据包的差错率越低, 从而降低数据重发的次数, 提高系统的可靠性。随着光传输技术的不断发展和电子纠错技术的应用, 可容忍的误码率 (BER) 提高了几个数量级, 克服了有效性和可靠性

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-05-18; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金 (61775012)

\* E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

折中的制约作用,为加长数据包提供了前提条件。其次,交换机存储器的存储容量和波分复用(WDM)系统的交叉干扰问题也是制约数据包长度的因素。对于异步数据通信,通常采用存储-转发的方式进行交换,但存储容量有限,因此,数据包的长度不能无限制的增加。在光通信网络以及5G网络中,都使用了WDM技术<sup>[5-7]</sup>。包括有源、无源稀疏波分复用(CWDM)技术、光传送网/波分复用(OTN/WDM)技术和波分复用-无源光网络(WDM-PON)技术等<sup>[8-9]</sup>。

在WDM系统中,数据包长度的增加,对于同步通信体制,如SDH和OTN,由于采用了扰码等技术,使连“1”和连“0”数控制在数个比特内,平均功率比较平稳,对掺铒光纤放大器(EDFA)的影响较小。但同步网络中即使用户不使用该信道,容器也要给该用户留出来,造成浪费。对于异步通信体制,如ATM,IP over WDM,不包括封装在SDH帧的多协议标签交换(MPLS)以及PTN。为了在同一波长下容纳来自不同用户、不同长度的数据包,保护间隙较大,同时为了实现同步付出的代价较大,如PTN的同步时间接近ms量级。当数据包长度与EDFA的增益恢复时间相当,且不同波长上的数据包间隔不相等时,不同波长信号间会出现明显的串扰,这种串扰限制了数据包长度,也是降低系统延时、提高系统可靠性的主要因素。

人们研究了WDM系统中由EDFA造成的串扰及其增益特性和增益恢复时间对串扰的影响。宋开等<sup>[10-11]</sup>研究了EDFA的瞬态增益和频率响应;Giles等<sup>[11]</sup>在研究EDFA串扰的同时发现,增益恢复时间为110~340 μs,信号调制频率大于5 kHz时,增益饱和引起的串扰可以忽略不计,但会降低瞬时增益。Desurvire等<sup>[12-13]</sup>测量了EDFA的增益恢复时间,指出瞬态增益变化与泵浦功率和信号功率有关。Meena等<sup>[14]</sup>研究了EDFA对不同占空比脉冲信号的码型效应,并提出了两种抑制码型效应的方法。Meli等<sup>[15]</sup>的研究表明,在WDM系统中,当两传输信道接近或EDFA的增益接近饱和功率时,串扰会增加。为了抑制这种串扰带来的不利影响,Carter等<sup>[16]</sup>通过双级泵浦降低EDFA中不同波长信号的交叉增益调制效应;Motoshima等<sup>[17-18]</sup>采用动态增益补偿方法降低了EDFA中的串扰功率;Desurvire等<sup>[19]</sup>通过自动增益控制方法使EDFA的增益稳定;Al-Orainy等<sup>[20]</sup>研究了WDM环状网络中的串扰,发现在多波长EDFA级联中,使信道间

隔相等可减小串扰功率;Ho等<sup>[21]</sup>将多个接收器检测的不同信道信号进行加权求和,消除了来自其他相邻信道的串扰。

上述方法都没有从BER的角度定量研究WDM系统中由EDFA增益饱和引起的数据包串扰问题,无法直接评价数据包串扰对通信系统的影响。为了定量分析串扰引起的BER恶化程度,本文首先从理论上分析了EDFA的增益特性,并测量了EDFA的增益恢复时间,得到增益恢复时间与信号光功率、控制光功率、驱动电流等相关参数的关系。然后推导出EDFA中数据包发生串扰时的BER计算公式,分析了影响BER的因素。最后记录两个数据包串扰时的实验结果,再计算相应的BER,并对结果进行讨论和分析。

## 2 理论分析

### 2.1 EDFA的增益特性

EDFA中光脉冲复振幅 $A(z, t)$ 随传输距离 $z$ 和时间 $t$ 变化的传输方程为<sup>[22]</sup>

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A(z, t)}{\partial t} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} - i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) + \frac{\alpha}{2} A(z, t) = \frac{g_0/2}{1 + P(z)/P_{\text{sat}}} A(z, t), \quad (1)$$

式中,  $\beta_1 = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0}$  和  $\beta_2 = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0}$  为传播常数  $\beta$  的对角频率  $\omega$  在载波角频率  $\omega_0$  处的一阶和二阶偏导数,分别表示EDFA的群时延和色散,  $\gamma$ 、 $\alpha$  和  $g_0$  分别为EDFA的非线性系数、吸收系数和小信号增益系数,  $P(z)$  和  $P_{\text{sat}}$  分别为光脉冲功率和饱和光功率。

考虑到EDFA的光纤长度较短(约为10 m),且 $A(z, t)$ 随时间的变化较慢(准稳态状态),光纤端注入功率较小。因此,可忽略色散项和非线性极化项。存在泵浦光时,上能级载流子浓度超过透明载流子浓度,可以不考虑损耗项。得到EDFA增益在准稳态下的单程(从输入到输出的一次放大过程)增益 $G$ 为

$$G = G_0 \exp \left[ - (G - 1) \frac{P_{\text{in}}(t)}{P_{\text{sat}}} \right], \quad (2)$$

式中,  $G_0$  为EDFA的小信号增益,  $P_{\text{in}}(t)$  为入射光功率。由于单程增益 $G$ 由隐函数决定,当 $P_{\text{in}}(t)$ 随时间变化时,  $G$ 也随时间变化。一般来说,EDFA的

$G_0$  和  $P_{\text{sat}}$  随信号波长的变化而变化,但在实际应用 DWDM 技术时,通常使 EDFA 工作在放大倍数-波长特性曲线的平坦区。进一步采用均衡技术后,可以认为对于不同波长信号,EDFA 的  $G_0$  和  $P_{\text{sat}}$  相同。

当两波长不同( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ )的光同时进入 EDFA 时,两光之间会产生交叉增益调制。对于数字通信而言,在稳态条件下,假定  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  “0”码的光功率为零,“1”码的光功率分别为  $P_{\text{in}}(\lambda_1)$  和  $P_{\text{in}}(\lambda_2)$ ,两信号的输出功率分别为

$$P_1 = GP_{\text{in}}(\lambda_1), P_2 = GP_{\text{in}}(\lambda_2), \quad (3)$$

代入(2)式,得到

$$G = G_0 \exp \left[ - (G - 1) \frac{P_{\text{in}}(\lambda_1) + P_{\text{in}}(\lambda_2)}{P_{\text{sat}}} \right]. \quad (4)$$

设两光的入射功率不变,单独进入 EDFA 时,增益分别为  $G_{10}$  和  $G_{20}$ ,输出光功率分别为  $P_{10}$  和  $P_{20}$ ,可将(3)式改写为

$$P_1 = \frac{G}{G_{10}} P_{10}, P_2 = \frac{G}{G_{20}} P_{20}. \quad (5)$$

由(5)式可以得到存在交叉增益调制与无交叉增益调制时两信号稳态输出功率之间的关系。设 EDFA 的增益恢复时间为  $\tau$ ,还需要考虑从一个稳态过渡到另一个稳态过程中两不同波长光的串扰。此时,输出功率不是一个常数,而是一个随时间变化的量。

若  $\lambda_1$  光受  $\lambda_2$  光串扰前的初始输出功率为  $P_{10}$ ,受串扰后的稳态输出功率为  $P_1$ ,考虑到两个稳态过渡过程中  $\lambda_1$  光反转粒子数随时间  $t$  呈指数衰减<sup>[12]</sup>,其功率  $P'_1(t)$  为指数衰减,则在两个稳态过渡过程中的  $P'_1(t)$  可表示为

$$P'_1(t) = P_1 + (P_{10} - P_1) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), t = 0 \sim T, \quad (6)$$

式中,  $T$  为两个数据包的串扰时间。

经实测,实验使用的 EDFA 增益恢复时间  $\tau$  在 100~200  $\mu\text{s}$  范围内。当数据包的长度为  $\mu\text{s}$  或小于  $\mu\text{s}$ (数据包的重复频率为 MHz 或大于 MHz)量级时,串扰时间  $t$  远小于  $\tau$ 。即  $P'_1(t)$  稍小于  $P_{10}$ ,串扰很小,可以忽略不计。当数据包的长度接近或大于  $\tau$  时,  $P'_1(t)$  处于  $P_{10}$  和  $P_1$  之间,有明显的数据串扰。联立(5)式和(6)式,得到串扰过程中  $\lambda_1$  光的功率为

$$P'_1(t) = \left\{ \exp(-t/\tau) + \frac{G}{G_{10}} [1 - \exp(-t/\tau)] \right\} P_{10}. \quad (7)$$

可以发现,  $P'_1(t)$  为随时间变化的函数,除了与 EDFA 的增益恢复时间有关,还与  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  光的入射功率有关。

## 2.2 EDFA 串扰对误码率的影响

EDFA 的交叉增益调制特性会在不同信道间产生串扰,导致误码率增加,若  $P_1$  和  $\sigma_1$  分别为  $\lambda_1$  光“1”码时的平均功率和噪声功率,  $P_0$  和  $\sigma_0$  分别为  $\lambda_1$  光“0”码时的平均功率和噪声功率,  $P_D$  为优化的判决阈值功率,则总误码率可表示为<sup>[23]</sup>

$$E_r = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{P_1 - P_D}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{P_D - P_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right], \quad (8)$$

式中,  $\operatorname{erfc}$  为互补误差函数。

为了简化计算,取  $\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma, P_0 = 0$ 。无串扰时,  $P_D = P_{10}/2$ ,令  $Q = P_{10}/2\sigma$ ,则  $E_r = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2})$ 。存在串扰时,假定  $P_D$  不变,则(8)式右边第一项表示将“1”码错判为“0”码的概率,存在串扰时,  $P_1$  变小,表明该项受串扰的影响;第二项表示将“0”码错判为“1”码的概率,不受串扰的影响。

设在无串扰时,总误码率为  $E_r^0$ ,“0”码误码率为  $E_r^0/2$ ,则存在串扰时,串扰只对“1”码有作用,此时的误码率可表示为

$$E_r = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{2P_1}{P_{10}} - 1 \right) \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} E_r^0. \quad (9)$$

当讨论稳态串扰的误码率时,(9)式中的  $P_1/P_{10}$  可以通过(5)式得到;当讨论稳态过渡过程,(9)式中的  $P_1$  用  $P'_1(t)$  代替,误码率为串扰时间内的平均误码率,可表示为

$$E_r = \frac{1}{4T} \int_0^T \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{2P'_1(t)}{P_{10}} - 1 \right) \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] dt + \frac{1}{2} E_r^0. \quad (10)$$

当数据包的长度固定时,可以估计出两个数据包的串扰时间。当数据包为随机长度时,串扰时间不确定,需要用统计方法得出。根据(10)式可知,影响误码率的因素有串扰时间  $T$ 、EDFA 的参数(增益特性、增益恢复时间、驱动电流)以及两不同波长光的输入功率。

通过(10)式可从理论上分析由 EDFA 串扰导致的误码率恶化情况,对评估 DWDM 系统的性能有重要意义。实际上,在计算稳态过渡过程中串扰引起的误码率时,  $P'_1(t)$  还可以通过实验测量得到。因此,可分别从理论和实验方面计算同一串扰引起的误码率。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 EDFA 增益恢复时间的测定

测量 EDFA 交叉增益特性和增益恢复时间的装置如图 1 所示。激光器 LD1 发出波长  $\lambda_1 = 1557.94 \text{ nm}$  的直流信号光,激光器 LD2 被脉冲形状和频率可调的低频信号源直接调制,发出波长  $\lambda_2 = 1554.12 \text{ nm}$  的脉冲控制光。两波长不同的光经波分复用器 WDM1 一起进入 EDFA 被放大。从 EDFA 输出的  $\lambda_1$  光经波分复用器 WDM2 滤出,进入光电探测器 (detector) 变为电信号后由示波器 (oscilloscope) 记录。通过观察输出波形并记录数据,可分析 EDFA 的交叉增益调制效应,并测量出不同条件下 EDFA 的增益恢复时间,实验结果如图 2 所示。

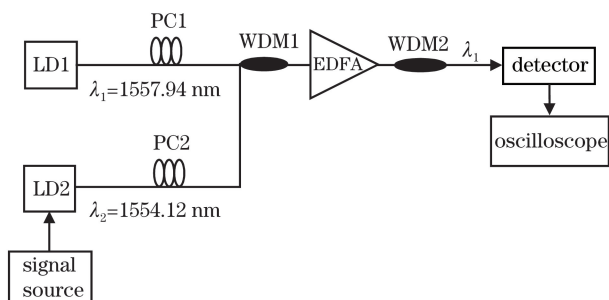


图 1 EDFA 交叉增益的测量装置

Fig. 1 Measuring device of EDFA cross-gain

从图 2 可以发现,脉冲频率约为 300 Hz,在串扰前(高电平)和串扰后(低电平)两个稳态间有明显的过渡过程,这种转换过程以指数函数的形式进行。利用(6)式,对测量数据进行拟合,得到此时的增益恢复时间  $\tau$ 。图 3 为仅改变 EDFA 的驱动电流  $I$ ,信号光功率  $P_{in}(\lambda_1)$  和控制光功率  $P_{in}(\lambda_2)$  时,  $\tau$  的变化情况。可以发现,  $\tau$  随  $I$  的增大而减小,原因是

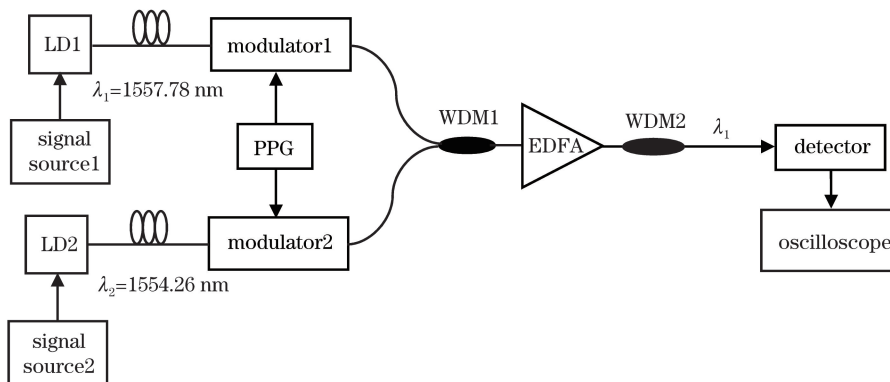


图 4 数据包串扰实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of data packet crosstalk experiment

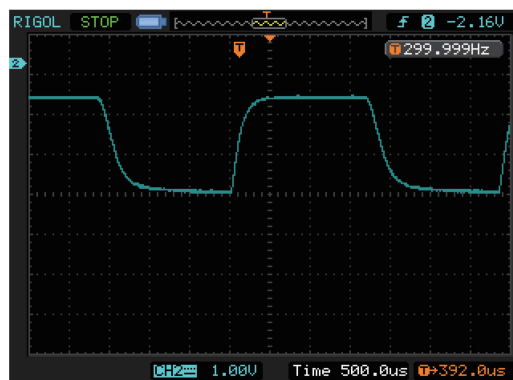


图 2 交叉增益调制的实验结果

Fig. 2 Experiment result of cross-gain modulation

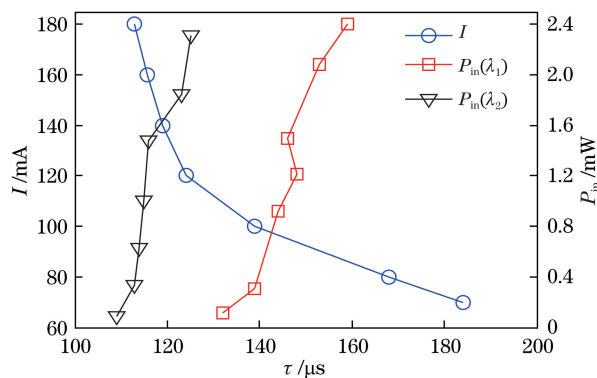


图 3 增益恢复时间随驱动电流和入射光功率的变化

Fig. 3 Gain recovery time changes with drive current and incident optical power

$I$  越大,提供的载流子越多,增益就越容易恢复。 $\tau$  随  $P_{in}(\lambda_1)$  或  $P_{in}(\lambda_2)$  的增大略有增大,这表明用单一参数  $\tau$  描述增益恢复的过程,只是一个近似模型,与实际情况略有差异。

#### 3.2 误码率影响实验

为了研究数据包串扰对误码率的影响,测量数据包通过 EDFA 时产生的串扰,实验装置如图 4 所示。

## 1) 数据包的产生

激光器 LD1 发出波长  $\lambda_1 = 1557.78$  nm 的直流光,由外调制器 modulator1 调制后,变为承载数据的信号光;数据信号由可编程伪随机码发生器 PPG 产生,实验中数据信号是速率为 1 Gbit/s,长度为  $2^7 - 1$  的伪随机二进制序列 (PRBS)。为了形成一

定长度的数据包,用低频信号发生器对 LD1 进行直接调制,调制频率为 100 Hz,占空比为 0.6,光脉冲持续时间为 6 ms。形成包长为 6 ms,长度为 750 KB 的数据包 1,如图 5(a)所示。激光器 LD2 产生数据包 2 的过程与 LD1 完全类似,如图 5(b)所示,数据包的长度为 3.33 ms。

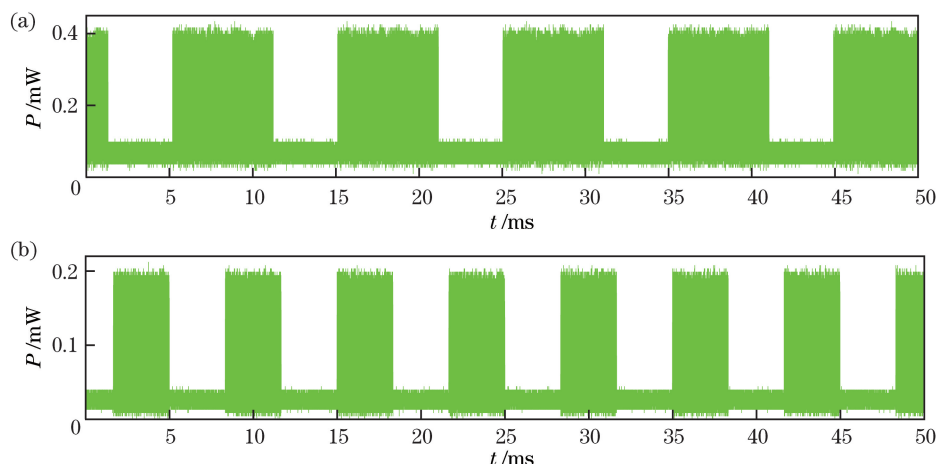


图 5 数据包的波形图。(a)数据包 1;(b)数据包 2

Fig. 5 Waveform of packets. (a) Data packet1; (b) data packet2

需要说明的是真实情况下数据包的间隔没有实验显示的那样大,为了凸显串扰效果,实验选取的占空比相对较低,占空比取 0.9 以上,更接近实际情况。

## 2) 串扰实验结果

由图 4 可知,数据包 1 和数据包 2 通过 WDM1 后同时进入 EDFA 中,经 EDFA 放大和 WDM2 滤波后,被串扰影响的数据包 1 进入光电探测器,被示

波器记录。数据包的包长分别为 3.33 ms 和 0.1 ms 时,数据包 2 对数据包 1 产生的串扰如图 6 所示。可以发现,当数据包 2 的包长较长时,数据包 1 受串扰影响较大,很多“1”码经过交叉增益调制后被压缩到判决电平附近;当数据包 2 较短时,数据包 1 受到的影响较小,对“1”码的压缩较小,对误码率的影响也较小。

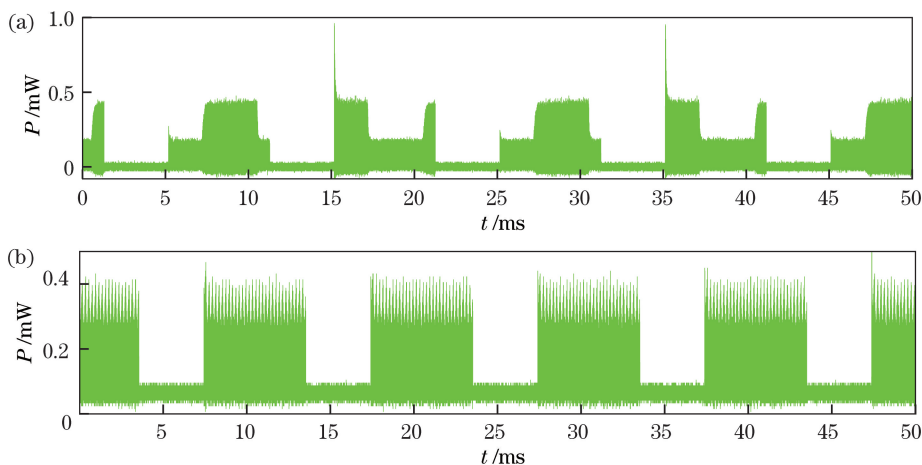


图 6 数据包 2 对数据包 1 的影响。(a)数据包 2 的包长为 3.3 ms;(b)数据包 2 的包长为 0.1 ms

Fig. 6 Effect of packet2 on packet1. (a) Packet length of data packet2 is 3.3 ms; (b) packet length of data packet2 is 0.1 ms

## 3.3 数据包串扰引起的误码率恶化

为了研究数据包串扰对误码率的影响,保持数据包 1 的参数不变(包长为 6 ms,功率为  $24 \mu\text{W}$ ),改变数据包 2 的包长和输入功率,且在无

串扰时,数据包 1 的误码率为  $E_r^0 = 10^{-9}$ ,根据  $E_r^0 = \frac{1}{2} \text{erfc}(Q/\sqrt{2})$ ,得到  $Q = 5.9978$ 。

实验中数据包 1 的包长远大于数据包 2 的包长

(最长为 0.1 ms),因此,数据包 1 会受到数据包 2 若干次的串扰,除数据包 1 的前后沿外,串扰时间为数据包 2 的包长,因此,实验时两路信号不需同步,就可找到一个完整的受串扰影响周期,从而确定计算误码率所需要的  $P_{10}$ 、 $P'_1(t)$  和  $T$ 。其中,  $P'_1(t)$  除了用(7)式表示外,还可以通过实验测量得到。

1) 利用(10)式计算存在串扰时的误码率,首先需要计算(7)式中的  $G/G_{10}$ 。EDFA 的驱动电流  $I = 180$  mA,数据包 1 的输入功率为  $24 \mu\text{W}$ ,数据包 2 的输入功率分别为 27, 61,  $107 \mu\text{W}$ ,结合实测的 EDFA 增益特性,得到数据包 1 单独存在时 EDFA 的放大倍数  $G_{10}$  约为 143。两数据包同时存在,数据包 2 的输入功率分别为 27, 61,  $107 \mu\text{W}$  时,EDFA 的放大倍数  $G$  约为 62.0, 38.7, 24.8, 即  $G/G_{10}$  分别为 0.43、0.27 和 0.17。其次,需要确定 EDFA 的增益恢复时间  $\tau$ 。为了简化计算,仿真中取  $\tau = 100 \mu\text{s}$ 。最后,根据数据包 2 的包长,得到串扰时间  $T$ ,并通过(10)式计算出误码率。当数据包 2 的输入功率分别为 27, 61,  $107 \mu\text{W}$  时,数据包 1 的误码率随数据包 2 包长的变化如图 7 所示。

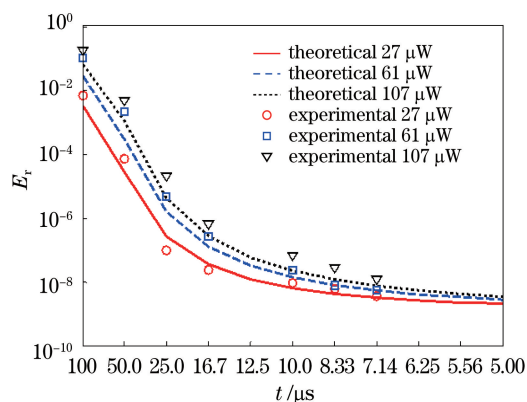


图 7 不同数据包 2 参数时数据包 1 的 BER  
Fig. 7 BER of data packet1 with different data packet2 parameters

2) 对于图 6 中的串扰,由于数据包的电平变动剧烈,无法使用示波器记录的眼图测量长数据包的误码率,只能通过示波器测量数据包 1 在无串扰和存在串扰的“1”码的功率  $P_{10}$ 、 $P'_1(t)$  及串扰时间  $T$ ,并代入(10)式计算出数据包 1 受到串扰时的误码率,结果如表 1 所示。为了与理论值进行对比,图 7 中也给出了表 1 中的结果。

表 1 数据包 1 的 BER  
Table 1 BER of packet 1

Power of packet2 / $\mu\text{W}$	Length of data packet2 / $\mu\text{s}$						
	100	50	25	16.67	10	8.33	7.14
27	$7.2 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-8}$	$9.2 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-9}$	$3.7 \times 10^{-9}$
61	$1.1 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-8}$	$7.9 \times 10^{-9}$	$5.4 \times 10^{-9}$
107	$1.8 \times 10^{-1}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$

从图 7 可以发现,尽管同一串扰下误码率的理论值和实验值相近,但也存在一定差异,主要原因: 1) 实验中使用光功率计测量数据包 1 和数据包 2 的输入功率,而光纤与功率计是活动连接,测量值和实际值存在较大误差; 2) 假设数据包 2 输入功率不同时,EDFA 的增益恢复时间相等。还可以发现,当数据包 2 的输入功率不变时,随着数据包 2 包长的减小,数据包 1 的误码率恶化程度变小。原因是数据包 2 的包长变小时,EDFA 中的交叉增益调制效应会变小,对数据包 1 的串扰也变小。当数据包 2 的包长小于  $5 \mu\text{s}$  时,串扰引起的误码率与无串扰时的误码率在同一量级,串扰对误码率的影响可以忽略。在数据包 2 的包长不变时,随着功率的增加,数据包 1 的误码率逐渐增大,原因是数据包 2 的功率变大会增加交叉增益效应,使数据包 1 受到的串扰更严重。

## 4 结 论

在异步通信体制的 WDM 网络中,大数据包在

EDFA 信道间的串扰会导致误码率增加,通信质量下降。通过测量得到 EDFA 的增益恢复时间为亚 ms 量级,且随 EDFA 驱动电流的增大而减小,随信号光功率和控制光功率的增大而增大。推导了 EDFA 中数据包受串扰影响时误码率的计算公式,讨论了影响误码率的相关因素。最后搭建了大数据包产生和串扰的实验系统,得到受串扰时包长和功率对误码率的影响,为未来 5G 网络传输大数据包时出现的误码率问题提供有益参考。

## 参 考 文 献

[1] Lin H C, Sun W B, Guo J C, et al. Research progress of 5G advanced technologies [J]. Telecommunications Science, 2018(8): 34-45.  
林泓池, 孙文彬, 郭继冲, 等. 5G 先进技术研究进展 [J]. 电信科学, 2018(8): 34-45.

[2] Ji Y F, Zhang J W, Xiao Y M, et al. 5G flexible optical transport networks with large-capacity, low-latency and

- high-efficiency[J]. *China Communications*, 2019, 16(5): 19-32.
- [3] Liu X, Effenberger F. Emerging optical access network technologies for 5G wireless[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(12): B70-B79.
- [4] Xu G B, Zhao D W, He X C. Analysis of 5G frame structure[J]. *Information & Communications*, 2018, 31(9): 13-15.  
许光斌, 赵大威, 何旭初. 5G 帧结构分析[J]. *信息通信*, 2018, 31(9): 13-15.
- [5] Zhao Z S. Past, present and future of optical fiber communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900109.  
赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900109.
- [6] Guo A H, Feng S Y, Xue L, et al. Research on power efficient routing algorithm in green optical networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0406002.  
郭爱煌, 冯圣毅, 薛琳, 等. 基于节能的绿色光网络路由算法的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0406002.
- [7] Yang X F, Zhao K. Wavelength and bandwidth allocation of WDM-PON based on mobile fronthaul network[J]. *Communications Technology*, 2018, 51(6): 1338-1343.  
杨勋发, 赵凯. 基于移动前传网络的 WDM-PON 波长带宽分配方法研究[J]. *通信技术*, 2018, 51(6): 1338-1343.
- [8] Wey J S, Zhang J W. Passive optical networks for 5G transport: technology and standards[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(12): 2830-2837.
- [9] Fu F C, Wang P, Mao Y, et al. Key technology and deployment strategy of 5G fronthaul transport networks[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(8): 147-151.  
扶奉超, 王鹏, 毛宇, 等. 5G 前传方案研究和部署策略[J]. *电信科学*, 2019, 35(8): 147-151.
- [10] Song K, Fan C C. Frequency response and transient gain of erbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(5): 616-620.  
宋开, 范崇澄. 掺铒光纤放大器的频率响应和瞬态增益[J]. *光学学报*, 1999, 19(5): 616-620.
- [11] Giles C R, Desurvire E, Simpson J R. Transient gain and cross talk in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(16): 880-882.
- [12] Desurvire E. Analysis of transient gain saturation and recovery in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, 1(8): 196-199.
- [13] Jiang N, Wu C Q, Wang Y J, et al. Measurement and analysis of recovery time of erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(2): 176-178.  
姜楠, 吴重庆, 王拥军, 等. EDFA 增益恢复时间的测定及分析[J]. *半导体光电*, 2007, 28(2): 176-178.
- [14] Meena D, Sarath K T, Francis F, et al. Mitigation of EDFA transient effects in variable duty cycle pulsed signals[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(3): 276-281.
- [15] Meli F, Angellieri M, Grasso G. Gain crosstalk in saturated EDFA for WDM applications[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(20): 1896-1897.
- [16] Carter D A, Korn J. Cross-gain saturation reduction in a double-stage overpumped EDFA with pump reuse[C]// *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Edition. CLEO' 99. Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 23-26, 1999, Baltimore, Maryland, US. New York: IEEE, 1999: 218-219.
- [17] Motoshima K, Shimizu K, Takano K, et al. EDFA with dynamic gain compensation for multiwavelength transmission systems[C]// *Optical Fiber Communication*, February 20, 1994, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 1994, 4: ThC4.
- [18] Motoshima K, Leba L M, Chen D N, et al. Dynamic compensation of transient gain saturation in erbium-doped fiber amplifiers by pump feedback control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(12): 1423-1426.
- [19] Desurvire E, Zirngibl M, Presby H M, et al. Dynamic gain compensation through optical feedback in saturated erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 12-17, 1991, Baltimore, Maryland, USA. Washington, D.C.: OSA, 1991, 10: CThJ3.
- [20] Al-Orainy A A. Analysis of crosstalk in WDM-ring networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(12): 1445-1447.
- [21] Ho K P, Kahn J M. Methods for crosstalk measurement and reduction in dense WDM systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(6): 1127-1135.
- [22] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics, third edition & applications of nonlinear fiber optics*[M]. Jia D F, Yu Z H, Tan B, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002: 382-384.  
Agrawal G P. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 382-384.
- [23] Wu C Q. *Introduction to optical communication*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 160-163.  
吴重庆. *光通信导论*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 160-163.