

少模掺铒光纤放大器的等效掺铒浓度仿真方法研究

许焰, 武保剑*, 江歆睿, 郭浩森, 文峰

电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 提出一种少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)仿真方法,通过引入泵浦相关的等效掺铒浓度参数来拟合双向泵浦实验数据,并用VPI软件高效仿真FM-EDFA的级联传输性能。采用光隔离波分复用器(IWDM)开展了LP₀₁和LP₁₁两模双向泵浦放大实验,验证了上述仿真方法的可行性。通过优化前后向泵浦功率的比例,设计了一款模式增益约为11 dB的均衡FM-EDFA;仿真结果表明,该FM-EDFA循环传输10次后的差模增益和光信噪比分别为0.56 dB和27 dB,大于32 GBaud DP-32QAM模分复用信号传输系统纠错后无误码所要求的光信噪比阈值。

关键词 光学器件; 少模掺铒光纤放大器; 双向泵浦; 仿真方法; 差模增益

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220595

1 引言

目前,单模光纤通信系统的信道容量已逼近香农极限。采用模分复用等空分复用技术能够有效扩展信道容量,使光纤的传输容量由Tbit/s提升至Pbit/s量级^[1-2]。少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)作为长距离模分复用系统的关键中继器件,在模分复用(MDM)系统中发挥着重要作用^[3-5]。对于FM-EDFA而言,高模式增益和低差模增益(DMG)是人们普遍追求的目标,其中差模增益作为FM-EDFA的特有性能参数,影响着MDM系统的性能以及多人多出(MIMO)数字信号处理(DSP)算法的复杂程度^[6]。

在研制FM-EDFA过程中,离不开FM-EDFA理论模型的指导。最为常用的FM-EDFA理论模型是强度模型^[7],该模型可用于优化掺铒光纤(EDF)的长度、泵浦模式及功率分配等^[8-9]。FM-EDFA的强度模型可用铒离子浓度的速率方程和信号(或泵浦)模式功率演化方程描述,其中铒离子掺杂浓度分布和信号(或泵浦)模场分布是最基本的已知条件。模场分布可由掺铒光纤的折射率分布计算得到,但铒离子的掺杂浓度分布往往难以获得^[10-11],这给理论计算与实验结果的对比带来了很大困难。对于掺铒浓度分布或折射率分布十分复杂的掺铒光纤^[12]来说,理论计算或仿真过程更加复杂。例如,在诸多仿真平台中,复杂的折射率分布需要通过文件形式导入仿真系统。因此,保持FM-EDFA理论计算结果(或仿真结果)与实验结果的一致性,是设计FM-EDFA级联传输系统的重要前提。

本文提出了一种基于等效掺铒浓度的FM-EDFA仿真方法,并采用VPI仿真软件研究了FM-EDFA循环级联系统的长距传输性能,以降低搭建MDM系统的实验成本,同时优化FM-EDFA的设计,满足不同场景对FM-EDFA性能的要求,如补偿少模传输光纤的模式相关损耗等。需要说明的是,这里所指的等效掺铒浓度与实际掺铒光纤的掺铒浓度参数不同,前者依赖于FM-EDFA的具体配置,如泵浦光模式及其功率分配等。为了验证上述仿真方法的可行性,本团队开展了两模EDFA放大实验。在实验中,采用功率转换效率高的1480 nm双向泵浦方式^[13],前向和后向泵浦模式分别为LP₁₁和LP₀₁模,并保持泵浦总功率为200 mW。通过改变前后向泵浦的比例可以调节LP₁₁和LP₀₁信号模式的增益和差模增益。研究表明,双向泵浦EDFA的等效掺铒浓度可由单独前向泵浦和单独后向泵浦情形下的等效掺铒浓度按泵浦功率比例加权得到。在此基础上,本团队在VPI仿真软件中设计了一个差模增益近乎为零的两模EDFA,并采用光纤循环器仿真了其级联系统的长距离传输性能。

2 等效掺铒浓度仿真方法的理论基础

在有源掺铒光纤中,铒离子吸收泵浦的光子能量后由基态跃迁到激发态能级,并很快弛豫到亚稳态能级。掺铒光纤中掺杂铒离子的总浓度为 $N_0 = N_1 + N_2$,其中 $N_2(x, y, z, t)$ 和 $N_1(x, y, z, t)$ 分别为亚稳态和基态能级的铒离子浓度。稳态时,亚稳态能级的铒离子浓度满足速率方程^[14]

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-04-20; 网络首发日期: 2022-05-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(62171078)

通信作者: *bjwu@uestc.edu.cn

$$N_2(x, y, z) = \frac{\frac{I_s \sigma_{as}}{h\nu_s} + \frac{I_p \sigma_{ap}}{h\nu_p}}{\frac{1}{T_1} + \frac{I_s(\sigma_{as} + \sigma_{es})}{h\nu_s} + \frac{I_p(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})}{h\nu_p}} N_0(x, y, z), \quad (1)$$

式中: I_p 为泵浦光的光强分布, $I_p = \sum_{j=1}^n |f_j^{(p)}(x, y)|^2 [P_j^{(p,+)}(z) + P_j^{(p,-)}(z)]$, 其中 $f_j^{(p)}$ 为 j 模式泵浦光的模场分布, $P_j^{(p,+)}$ 和 $P_j^{(p,-)}$ 为 j 模式泵浦光的功率; I_s 为信

号光的光强分布, $I_s = \sum_{i=1}^m |f_i^{(s)}(x, y)|^2 P_i^{(s)}(z)$, 其中 $f_i^{(s)}$ 和 $P_i^{(s)}$ 分别为 i 模式信号光的模场分布和功率; T_1 为亚稳态能级铒离子的弛豫时间; ν_s 和 ν_p 分别为信号光和泵浦光的频率; h 为普朗克常数; σ_{as} 和 σ_{es} 分别为信号光的吸收截面和辐射截面; σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别为泵浦光的吸收截面和辐射截面。

在 FM-EDFA 强度模型中, 信号光和泵浦光的强度沿着 $+z$ 传播方向演化, 掺铒光纤输出端 ($z=L$, L 为光纤长度) 的输出光功率^[15]为

$$P_{i,z=L}^{(s)} = P_{i,z=0}^{(s)} \exp \left[(\sigma_{as} + \sigma_{es}) \int_0^L \int_R N_2(x, y, z) |f_i^{(s)}(x, y)|^2 dx dy dz - \sigma_{as} \int_0^L \int_R N_0(x, y, z) |f_i^{(s)}(x, y)|^2 dx dy dz \right], \quad (2)$$

$$P_{j,z=L}^{(p,u_j^{(p)})} = P_{j,z=0}^{(p,u_j^{(p)})} \exp \left[u_j^{(p)} (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \int_0^L \int_R N_2(x, y, z) |f_j^{(p)}(x, y)|^2 dx dy dz - u_j^{(p)} \sigma_{ap} \int_0^L \int_R N_0(x, y, z) |f_j^{(p)}(x, y)|^2 dx dy dz \right], \quad (3)$$

式中: $u_j^{(p)} = \pm 1$ 分别表示前向泵浦和后向泵浦。由式 (2) 可得信号光的模式增益为

$$G_i = 10 \lg \left[\frac{P_{i,z=L}^{(s)}}{P_{i,z=0}^{(s)}} \right]. \quad (4)$$

由式 (1)~(4) 可知亚稳态能级的铒离子浓度 N_2 由掺铒浓度 N_0 、信号光和泵浦光的归一化模场以及泵浦光和信号光的功率决定。信号的增益依赖于 N_2 、掺铒光纤长度、信号归一化模场分布, 这些参数之间的相互关系如图 1 所示。根据 FM-EDFA 的强度理论模型, 由式 (1) 可知亚稳态能级的铒离子浓度 N_2 除了与铒离子的掺杂浓度 N_0 有关外, 还依赖于信号光和泵浦光模式的强度分布, 而且它还会影响信号光或泵浦光的模式功率演化。在理想模型下, 往往认为信号光或泵浦光的归一化模场分布是理想的, 且不随空间变化。但实际情况是: 1) 在掺铒光纤横截面上, 信号光或泵浦光模场之间的相对位置很难严格保持, 甚至其模场分布还会随传输距离发生变化^[14]; 2) 在实际的少模放大过程中模式转换不可避免, 这不仅会影响掺铒光纤的增益特性, 还会影响整个放大器的模式增益测量结果^[4]; 3) 在 FM-EDFA 放大实验中, 所激发的信号光和泵浦光模式很难达到理想的空间模式分布; 4) 直观地讲, 如果铒离子的掺杂浓度 N_0 在光纤中的分布发生变化, 也会影响模式增益; 等等。理想模型与实际情况的差异, 必然会导致传统的理论计算很难获得与实验测量一致的结果。根据图 1 所示的 FM-EDFA 理论模型中参量之间的关系, 本文引入等效掺铒浓度参数 \bar{N} 来代替理论模型中的 N_0 , 进而仿真拟合实验中的模式增益曲线^[16]。 \bar{N} 不依赖于位置, 在给定的仿真配置中视为均匀分布, 无需在意实际的 N_0 是否为均匀分布, 可使仿真过程更加简化。改变 EDFA 的泵浦特性, 会影响亚稳态能级的铒离子浓度 N_2 , 从而改变信号光模式

的增益。因此, 等效掺铒浓度 \bar{N} 也依赖于泵浦方式、泵浦模式分布及泵浦功率等。本文将上述现实因素带来的影响用等效掺铒浓度拟合, 以尽可能得到与实验结果一致的模式增益。上述因素对掺铒光纤长度的依赖性, 也会导致等效掺铒浓度仿真方法与掺铒光纤长度有关。在本文的等效铒离子浓度仿真方法中, 信号光和泵浦光的模场分布始终保持理想状态。理论分析和仿真计算均表明, 不考虑实际中的诸多因素时, 即在完全理想情形下, 等效掺铒浓度就等于实际的铒离子掺杂浓度。然而, 实验中信号光和泵浦光的模式并非像理论上认为的那般理想, 它们的模场会因受到诸多因素的影响而发生变化, 影响信号光的模式增益。在理论计算或仿真中, 这些不利因素很难被全部考虑, 因而往往导致仿真结果与实验结果具有一定差异。

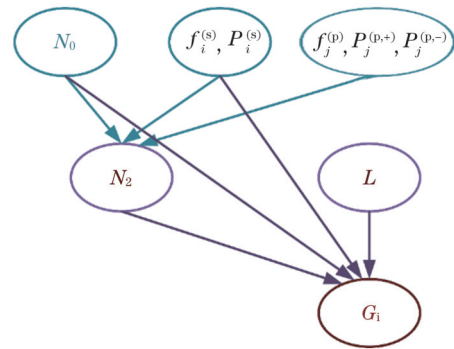


图 1 FM-EDFA 理论模型中参量之间的关系
Fig. 1 Relationship between parameters in FM-EDFA's theoretical model

3 双向 FM-EDFA 实验与等效掺铒浓度的计算

为了说明等效铒离子浓度仿真方法的可行性, 本

团队开展了双向泵浦掺铒光纤放大实验,并计算了不同泵浦功率组合下的等效铒离子浓度。在实验中,信号光模式 LP_{01} 和 LP_{11} 的波长分别为 1550 nm 和 1551 nm,泵浦光采用 1480 nm 波长,前向泵浦模式为 LP_{11} ,后向泵浦模式为 LP_{01} 。输入信号和泵浦的空间模式均由相应的模式选择光子灯笼(MSPL)激发,模式的强度分布由红外相机观察。在双向泵浦实验中,采用本团队设计制作少模光隔离波分复用器(FM-IWDM)对信号光和泵浦光进行复用和解复用,如图 2(a)所示。FM-IWDM 的结构与相应的单模器件类似^[17],可以同时执行光隔离器和 WDM 的功能。测试后可知:1)正向 FM-IWDM 对 LP_{01} 和 LP_{11} 信号光的插入损耗分别为 0.84 dB 和 1.84 dB,对 LP_{01} 与 LP_{11} 泵浦光的插入损耗分别为 4.9 dB 和 4.3 dB;2)反向 FM-IWDM 对 LP_{01}

与 LP_{11} 信号光的插入损耗与正向 FM-IWDM 一致,对 LP_{01} 与 LP_{11} 泵浦光的插入损耗分别为 5 dB 和 5.3 dB。用光谱仪(OSA)测量输出信号光的模式增益,然后根据 FM-IWDM 的插入损耗推算出少模掺铒光纤的输入和输出信号光功率,进而计算模式增益。图 2(a)给出了两个模式信号输入光功率均为 -15 dBm 时,前向泵浦情形下放大信号的典型光谱图。同时,本团队搭建了如图 2(b)所示的 VPI 仿真平台,模拟实验中输入到少模掺铒光纤中的泵浦光和信号光的功率(这里不涉及 FM-IWDM,下面部分会加以考虑)。所用少模掺铒光纤的折射率分布如图 2(a)所示,少模掺铒光纤的纤芯半径为 9.5 μm ,长度为 3 m。仿真中考虑了光隔离波分复用器(IWDM)尾纤与少模掺铒光纤之间的耦合损耗^[18]。

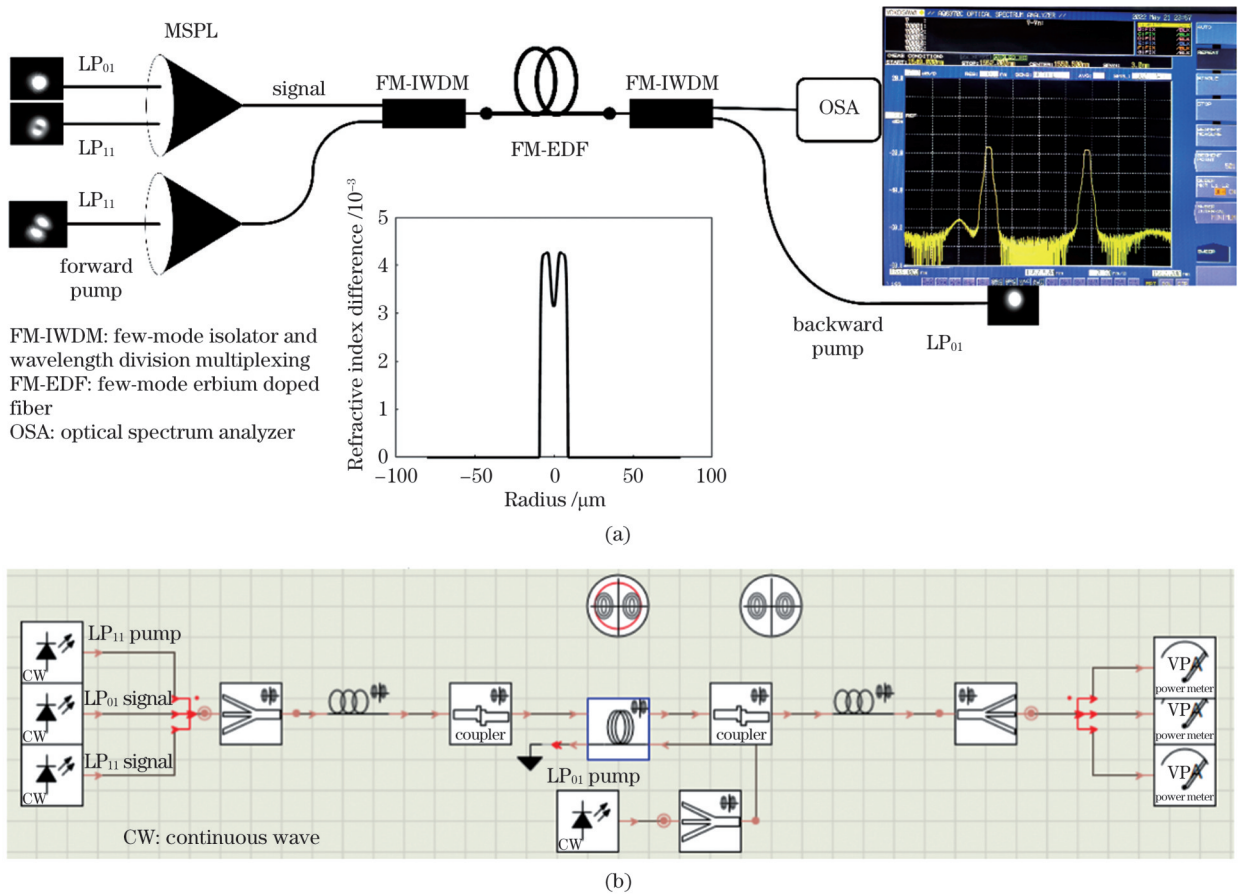


图 2 双向泵浦 FM-EDFA 的两模放大实验与仿真。(a)实验装置;(b)VPI 仿真平台

Fig. 2 Experiment and simulation of two-mode FM-EDFA under bidirectionally pumping way. (a) Experimental configuration; (b) VPI simulation platform

在实验中,保持泵浦光的入纤总功率为 200 mW,通过改变前后向泵浦光的分配比例调节 LP_{11} 和 LP_{01} 信号光模式的增益。当两个信号光模式的输入光功率均为 -15 dBm 时,模式增益随后向泵浦光功率比例 η_b ($\eta_b = P_b / 200 \text{ W}$)的变化如图 3 所示,其中 P_b 为后向泵浦光功率。在图 2(b)所示的仿真平台中,将掺铒浓度在 $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 至 $5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 之间以步长 $1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 进行扫描,计算两个信号模式的增益,并寻找

其与实验数据的最小方差,所对应的掺铒浓度即为该泵浦配置情形下的等效掺铒浓度。仿真结果表明,单独前向泵浦($\eta_b = 0$)和单独后向泵浦($\eta_b = 1$)时,等效铒离子浓度分别为 $\bar{N}_f = 3.88 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 和 $\bar{N}_b = 4.41 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$,仿真增益与实验数据间的方差不超过 1.2 dB。提高掺铒浓度的扫描精度或者降低实验测量误差,可以进一步减小仿真结果与实验数据之间的差异。

采用与上述相同的方法,也可以计算双向泵浦情形下($\eta_b = 0 \sim 1$)的等效掺铒浓度。这里采用一种简便的加权方法确定双向泵浦下的等效掺铒浓度,加权公式为 $\bar{N} = (1 - \eta_b) \bar{N}_f + \eta_b \bar{N}_b$, 模式增益的仿真曲线如图 3 所示。仿真结果与实验结果的最大差异仅为 1.3 dB, 验证了该加权方法的可行性, 该方法可用于实现双向泵浦情形下 FM-EDFA 的自动增益控制。在传

统的仿真方法中, 铒离子掺杂浓度为定值, 不随泵浦功率而改变。本文在分别得到前向泵浦和后向泵浦的等效掺铒浓度后, 将铒离子掺杂浓度设置为 \bar{N}_f 和 \bar{N}_b 的平均值 $N = 4.14 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 其他参数保持不变, 得到了在铒离子掺杂浓度为定值的条件下, 模式增益随泵浦比例的变化, 仿真结果与实验结果的最大差异为 2.1 dB。

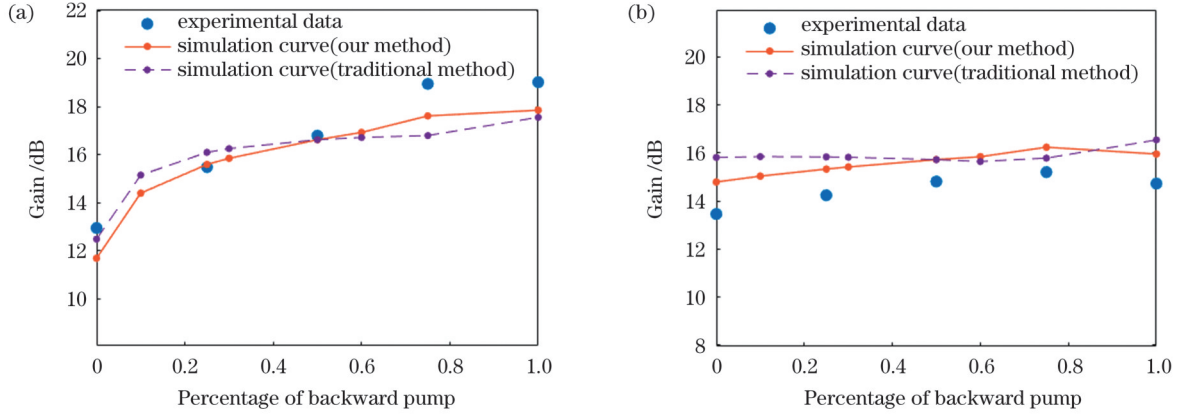


图 3 双向泵浦 FM-EDFA 的信号光模式增益。(a)LP₀₁模式;(b)LP₁₁模式

Fig. 3 Signal mode gain for FM-EDFA under bidirectional pumping. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode

4 FM-EDFA 的均衡设计及其级联性能仿真

现实实验中实现信号的长距离传输不仅成本高难以实现, 还需要用到光纤环路传输平台。本文提出的等效掺铒浓度仿真方法与实际情况更为贴合, 可以模拟少模掺铒光纤更接近现实的长距离传输系统。根据等效掺铒浓度仿真方法, 本团队设计了一种可实施的低差模增益双向泵浦掺铒光纤放大器, 并对其循环级联性能进行了仿真。采用 FM-IWDM 器件实现双向泵浦, 通过优化前后向泵浦功率的比例, 使掺铒光纤中的模式增益能够补偿 FM-IWDM 器件的模式相关损耗, 从而设计出差模增益接近 0 的均衡 FM-EDFA。测试结果表明, FM-IWDM 对 LP₀₁ 与 LP₁₁ 信号光的插入损耗分别为 0.84 dB 和 1.84 dB, 光隔离度大于 47 dB。本团队搭建了如图 4(a)、(b) 所示的 FM-IWDM 仿真器件, 并用其来模拟模式相关性。在所设计的 FM-EDFA 中, 复用和解复用 FM-IWDM 会给两个信号模式带来 2 dB 的模式相关损耗。显然, 若要正好补偿两个 FM-IWDM 的模式相关损耗, 则要求少模掺铒光纤部分的模式增益 G_{11} 比 G_{01} 正好大 2 dB。

仿真设计中采用与上述实验相同的掺铒光纤参数, 并保持进入掺铒光纤的信号模式功率为 -15 dBm。为了便于分析, 泵浦功率仍用输入到掺铒光纤的光功率表示, 泵浦总功率仍为 200 mW。由图 3 所示的仿真结果可知, 当后向泵浦模式 LP₀₁ 所占功率比例为 $\eta_b = 0.025$ 时, 少模掺铒光纤部分的模式增益分别为 $G_{01} = 12.95 \text{ dB}$ 和 $G_{11} = 14.86 \text{ dB}$, 此时前后向泵浦功率分

别为 5 mW 和 195 mW, 对应的等效掺铒浓度为 $3.89 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。这样, 包含 IWDM 的完整的 FM-EDFA 具有接近于 0 的差模增益, 模式增益约为 11.2 dB, 可用于补偿 55 km 少模光纤的传输损耗 (损耗系数按 0.2 dB/km 计算)。

由上述均衡 FM-EDFA 可构建循环级联仿真系统, 如图 4(c) 所示。仿真系统主要包括信号光模式激发单元、FM-EDFA 循环光路单元、信号光模式功率测量单元三部分, 其中 FM-EDFA 循环光路单元由所设计的均衡 FM-EDFA、55 km 长少模传输光纤和少模光循环器组成。仿真中始终保持输入掺铒光纤的信号光模式功率为 -15 dBm, 忽略少模传输光纤的模式相关损耗。图 5 给出了系统输出差模增益和光信噪比随循环次数 N 的变化情况。由图 5 可知差模增益 (G_{DMG}) 随循环次数增加基本呈线性变化。根据图中数据可以得到拟合曲线为 $D_{\text{DMG}} \approx 0.06 \times N - 0.04$ 。根据光放大器的级联特性, 级联系统输出的光信噪比 (R_{OSNR}) 随光放大器级联数目增大近似线性减小^[19], 根据图 5 可拟合出光信噪比与循环次数的关系为 $R_{\text{OSNR}} \approx 39 - 10 \lg(N)$ (以 dB 为单位)。

循环 10 次后, 整个级联系统传输 550 km, 差模增益和光信噪比分别约为 0.56 dB 和 27 dB。由文献 [20] 的实验结果可知, 相对于单模传输, 32 GBaud 的 DP-32QAM 模分复用信号传输系统在前向纠错 (FEC) 极限下约有 0.7 dB 的光信噪比劣化。就本文考察的 FM-EDFA 级联系统而言, 若考虑模式复用对光信噪比的劣化, 其实际输出光信噪比约为 26.3 dB, 仍大于 FEC 极限下所要求的光信噪比阈值 (约 24 dB)。

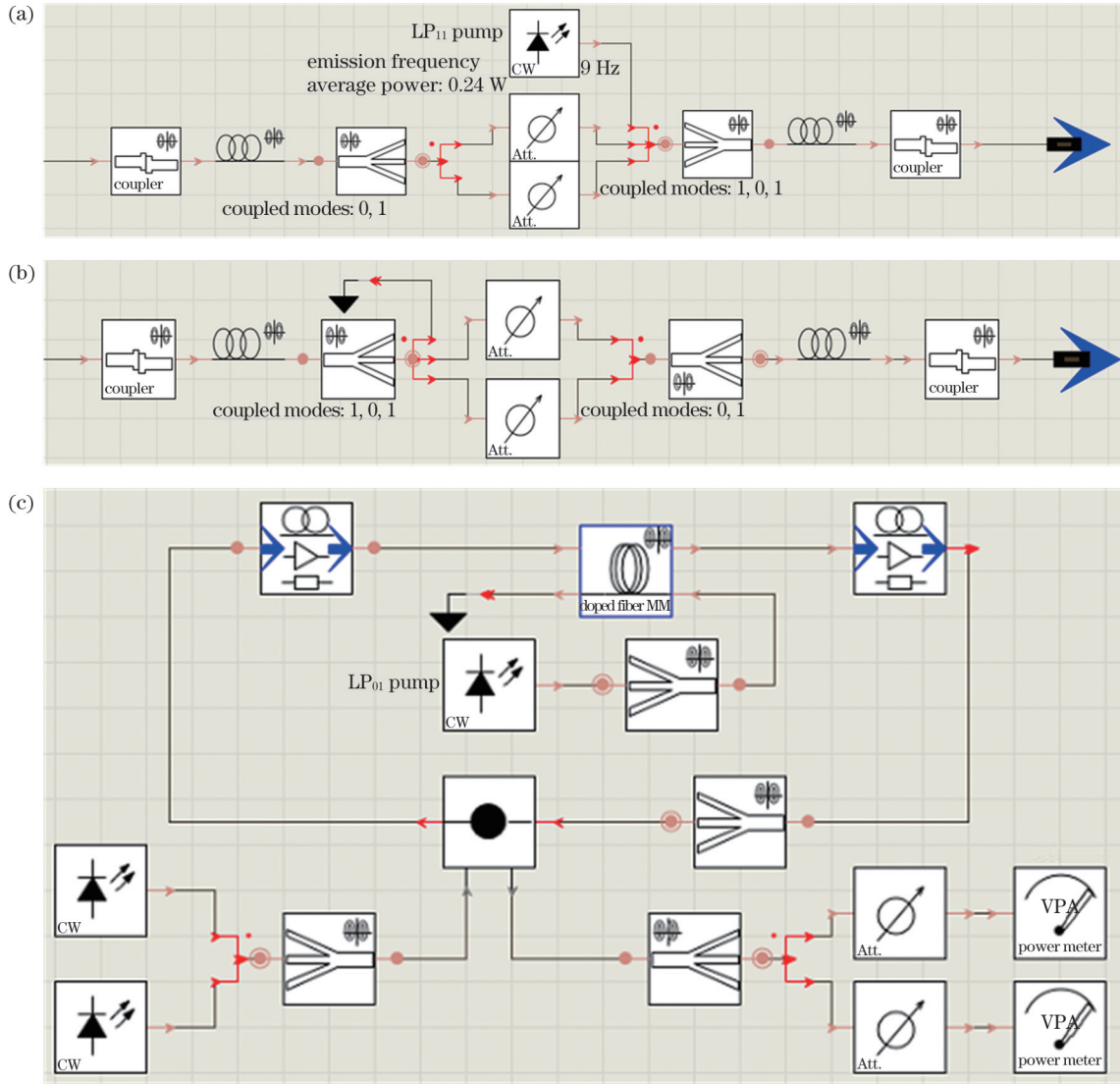


图 4 设计的增益均衡 FM-EDFA 及其光循环传输仿真。(a) FM-IWDM 模式复用器; (b) FM-IWDM 模式解复用器; (c) 光循环仿真
 Fig. 4 Designed FM-EDFA with gain equalization and its transmission simulation with optical circulating loop. (a) FM-IWDM mode multiplexer; (b) FM-IWDM mode demultiplexer; (c) optical circulating loop simulation

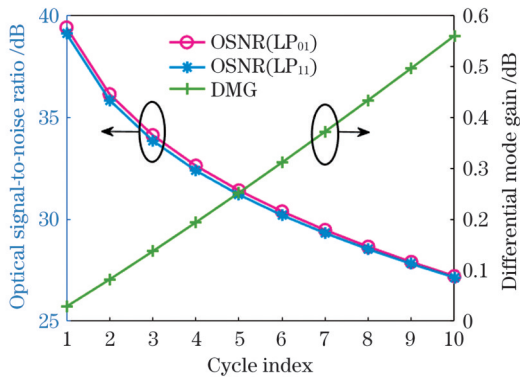


图 5 差模增益和光信噪比随循环次数的变化
 Fig. 5 Differential mode gain (DMG) and optical signal-to-noise ratio (OSNR) dependent on cycle index

本文以两模放大实验为例说明了等效铒离子浓度仿真方法的可行性, 并通过增加泵浦光功率设计出了更高增益的 FM-EDFA, 从而实现了高速信号更长距

离 (如 1000 km) 的级联传输。该仿真方法也可以用于分析更多模式的双向泵浦放大情形, 可以通过优化所有模式的整体最小方差获得等效铒离子浓度, 进而评估其级联系统性能。

5 讨 论

本团队提出等效掺铒浓度仿真方法的目的是仿真模拟复杂的现实情况, 以便根据有限的实验数据设计出满足实际需求的 FM-EDFA。该方法不仅可以指导后续进一步开展实验, 还有助于 FM-EDFA 的级联系统设计。由于现实情况的复杂性, 如激发模式不纯净、信号和泵浦模场空间位置的相对变化以及测量误差等因素, 采用传统理论方法直接计算增益很难获得与实验测量一致的结果。针对实验中参数的不确定性, 本文所提方法需要借助实验数据进行拟合, 扫描相应的等效掺铒浓度参数。对于本文方法, 只需根据前向泵

浦和后向泵浦两种状态下的实验数据,扫描出相应的等效掺铒浓度即可,无需再对双向泵浦功率组合下的等效掺铒浓度进行扫描。通过计算获得双向泵浦情形下的等效掺铒浓度并计算出相应的增益,从而优化前后向泵浦功率的分配,以达到所需的 FM-EDFA 增益与差模增益。本文提出的简便的加权方法获得了双向泵浦不同功率组合下的等效掺铒浓度,其中权值正比于泵浦功率。严格来讲,这种简单的线性加权方法会存在一定误差,但误差不大。若要进一步提高加权拟合的精度,可以采用非线性拟合方式,但需增加至少一个双向泵浦组合下的实验数据点,并扫描其等效掺铒浓度。

等效掺铒浓度仿真方法也可以推广至更多模式的情形下,但需根据所有信号模式的实验增益结果扫描

出相应条件下的等效掺铒浓度,优化目标是寻找其与实验数据的最小方差。图 6 给出了六模放大情形下前向泵浦、后向泵浦、等功率双向泵浦三种情形下每个模式的增益值(由 VPI 软件在完全理想情形下产生,相当于参考实验数据),光纤长度为 3 m,纤芯半径为 10 μm ,输入信号功率均为 -15 dBm。其中 LP_{11a} 模前向泵浦和 LP₀₁ 模后向泵浦的总功率仍保持为 300 mW。在此情形下,扫描获得的等效掺铒浓度为 $6 \times 10^{24} \text{ cm}^{-3}$,等效掺铒浓度仿真方法得到的计算曲线如图 6 所示。由图 6 可知,仿真曲线与 VPI 参考数据重合。事实上,所得等效掺铒浓度越接近一定值,意味着放大状态越接近理想情况。需要指出的是,在等效掺铒浓度模型中,通过定量分析实际存在的某些不确定因素(如模式串扰等),能够进一步提高该仿真方法的指导作用。

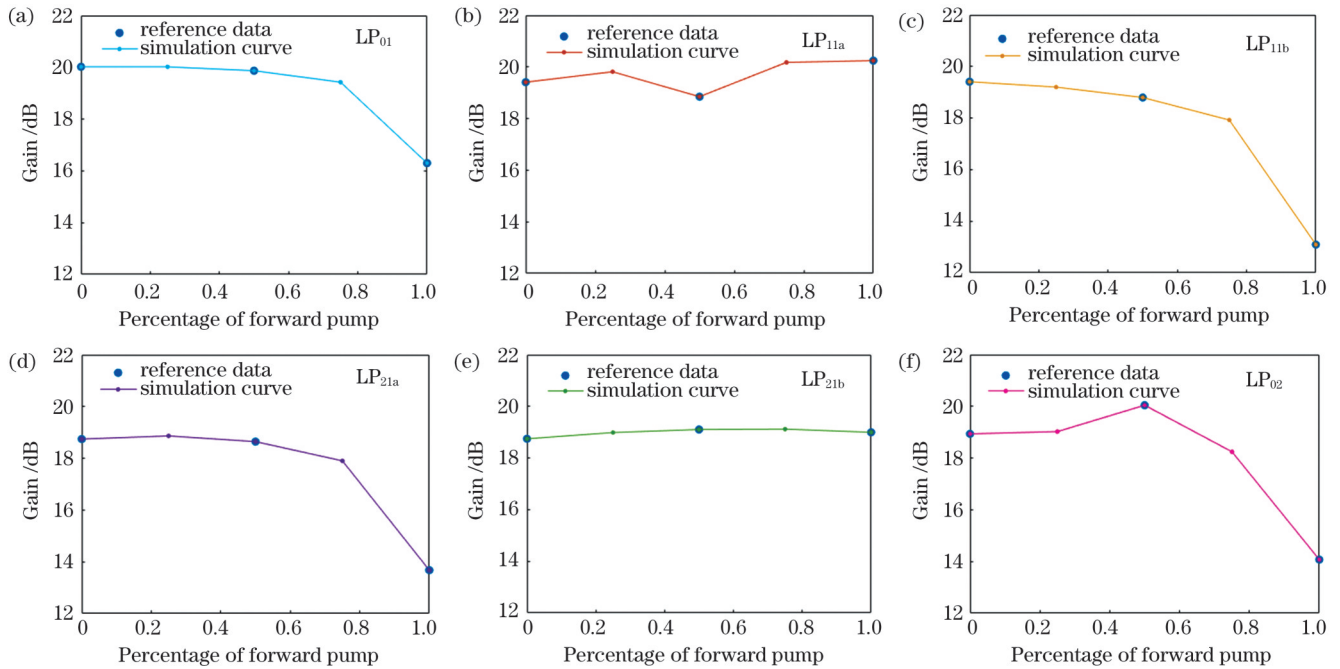


图 6 双向泵浦六模 EDFA 的信号光模式增益

Fig. 6 Signal mode gain for six-mode EDFA under bidirectional pumping

6 结 论

本团队采用 FM-IWDM 器件开展双向泵浦 EDFA 的两模放大实验,实验结果验证了基于等效掺铒浓度的 FM-EDFA 仿真方法的可行性;提出了一种简便计算双向泵浦 FM-EDFA 等效掺铒浓度的加权方法,仿真结果与实验数据的最大差异仅为 1.3 dB。通过优化双向泵浦功率分配来补偿 FM-IWDM 的模式相关损耗,本团队设计出了模式增益约为 11.2 dB 的增益均衡 FM-EDFA,并采用光循环仿真方法研究了其级联传输特性。仿真结果表明,经过 10 次循环传输后,整个系统的差模增益和光信噪比分别约为 0.56 dB 和 27 dB,有望支持 DP-32QAM 高阶调制格式信号的长距离传输。

参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [2] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
- [3] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [4] 郭浩森, 武保剑, 江歆睿, 等. 基于光子灯笼的模式功率检测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0106003.
Guo H M, Wu B J, Jiang X R, et al. Detection method of mode power based on photonic lantern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0106003.
- [5] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization

- technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106001.
- [6] Ono H, Hosokawa T, Ichii K, et al. Improvement of differential modal gain in few-mode fibre amplifier by employing ring-core erbium-doped fibre[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(2): 172-173.
- [7] Bai N, Ip E, Wang T, et al. Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16601-16611.
- [8] 王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906001.
Wang W S, Ning T G, Pei L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906001.
- [9] 阮江冉, 裴丽, 郑晶晶, 等. 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器的增益均衡[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0406001.
Ruan J R, Pei L, Zheng J J, et al. Gain equalization of 4-mode erbium-doped fiber amplifier based on cladding pump[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0406001.
- [10] Genevaux P, Simonneau C, Le Cocq G, et al. Amplification of 5 modes carrying each 100 Gb/s with a few mode EDFA[C]// *Optical Fiber Communication Conference*, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: Tu3C.5.
- [11] Jung Y, Kang Q Y, Sahu J K, et al. Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1100-1103.
- [12] Wang N, Kim I, Vassilieva O, et al. Low-crosstalk few-mode EDFA for single-mode fiber trunk lines and networks[C]// *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [13] Lei C M, Feng H L, Messaddeq Y, et al. Investigation of bi-directionally, dual-wavelength pumped extended L-band EDFAs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1227-1230.
- [14] Jiang X R, Wu B J, Xie Y Q, et al. A semi-analytic method for FM-EDFA intensity model[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102546.
- [15] Chen X W, Wu B J, Xie Y Q, et al. Analytical method for few-mode erbium doped fiber amplifiers[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(3): 035102.
- [16] Xu Y, Wu B J, Jiang X R, et al. Experimental measurement of absorption coefficients for effective erbium-doping concentration to optimize few-mode erbium-doped fiber amplifiers with low differential mode gain[J]. *Photonics*, 2021, 8(6): 185.
- [17] Srivastava A K, Sun Y, Zyskind J L, et al. EDFA transient response to channel loss in WDM transmission system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(3): 386-388.
- [18] Ho K P, Kahn J M. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems[M]//Kaminow I P, Li T, Willner A E. *Optical fiber telecommunications*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 491-568.
- [19] 武保剑, 邱昆. *光纤信息处理原理及技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 173-180.
Wu B J, Qiu K. *Fiber-optical information processing principles and technology*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 173-180.
- [20] Sleiffer V A J M, Leoni P, Jung Y, et al. 20×960 -Gb/s MDM-DP-32QAM transmission over 60 km FMF with inline MM-EDFA [C] // *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013.

Research on Simulation Method for FM-EDFAs by Effective Erbium Doping Concentration

Xu Yan, Wu Baojian*, Jiang Xinrui, Guo Haomiao, Wen Feng

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract

Objective Space-division multiplexing appears to be the only way to increase the capacity of optical transport networks since wavelength-division multiplexing is rapidly approaching its scaling limits. As a key relay device, the few-mode erbium-doped fiber amplifier (FM-EDFA) plays an important role in long-distance mode division-multiplexing (MDM) systems. The differential mode gain (DMG) and modal gain are important factors to evaluate the FM-EDFA's performance. The intensity model of FM-EDFA can be described by the rate equation of erbium ion concentration and the power evolution equation of the signal (or pump) mode. The distributions of erbium ion doping concentration and signal (or pump) mode field should be known in advance for theoretical calculations, with application to compare with experimental results or to optimize the performance of FM-EDFA. For example, the refractive index distribution must be imported into the simulation system as files in many simulation platforms. However, the complicated erbium-doped concentration distribution and the refractive index profile are usually unknown in most experiments. This research aims to offer a new simulation method to bypass the erbium-doped concentration distribution and accomplish the consistency of FM-EDFA's theoretical calculation (or simulation results) with the experimental data as possible.

Methods According to the relationship between the parameters used in the FM-EDFA's theoretical model shown in Fig. 1, an equivalent erbium doping concentration parameter was introduced to replace the real erbium doping concentration N_0 in the theoretical model, and then the equivalent erbium doping concentration parameter was obtained by simulating and fitting the mode gain curve measured by the experiment. Regardless of whether the actual N_0 is uniform in

the erbium-doped fibers, the gain of the signal modes depends on the pumping mode, pumping mode distribution, and its power; therefore, the equivalent erbium doping concentration also varies with the pumping parameters. Based on the equivalent erbium doping concentration, a new simulation method was proposed for FM-EDFAs, in which the equivalent erbium doping concentrations under the bidirectional pump case can be obtained from the two separate experiments with forward and backward pumping by weighting the pump power ratio. The simulation method is also used to efficiently simulate the cascading transmission performance of the FM-EDFAs.

Results and Discussions The experimental data and simulation results are compared to demonstrate the feasibility of the above simulation method. Two-mode amplification experiments of LP_{01} and LP_{11} under bidirectional pumping were carried out using the optically isolated wavelength-division multiplexers (IWDMs). In the experiment, the total pump power is fixed at 200 mW while the forward pump powers are varied. The optimal equivalent erbium doping concentrations for forward-pumping and backward-pumping cases are determined using the VPI simulation platform. The equivalent erbium doping concentration under the bidirectional-pumping case is obtained using a simple weighting method of $\bar{N} = (1 - \eta_b) \bar{N}_f + \eta_b \bar{N}_b$ and the simulation curve and experimental data of the mode gain are shown in Fig. 3. The feasibility of the weighting method is shown by the 1.3 dB difference between the simulation and the experimental data. The weighting method is very useful for the realization of FM-EDFA's automatic gain control. The maximum difference between the simulation and the experimental results increased to 2.1 dB when the fitting process is done by use of the conventional method with a fixed erbium ion doping concentration, which is greater than that of the equivalent concentration simulation method proposed in the paper. The simulation method of equivalent erbium doping concentration doesn't limit to the two-mode amplification. Figure 6 shows that our simulation curve coincides with the VPI reference data for the six-mode amplification. An equalized FM-EDFA with a mode gain of about 11 dB is designed by optimizing the power ratio of the forward and backward pumps. Our simulation shows that the DMG and optical signal-to-noise ratio (OSNR) after loop transmission with 10 FM-EDFAs are respectively 0.56 dB and 27 dB, exceeding the OSNR threshold of no bit error for 32 GBaud DP-32QAM MDM system.

Conclusions The two-mode amplification experiment of bidirectionally pumped EDFA is carried out using few-mode IWDM devices, which shows the feasibility of the FM-EDFA simulation method based on the equivalent erbium doping concentration, and provides a simple method to calculate the equivalent doping of bidirectionally pumped FM-EDFA. The highest difference between the simulation results and the experimental data using the weighting method of erbium concentration in the VPI simulation platform was only 1.3 dB. A gain-balanced FM-EDFA with mode gain of about 11.2 dB is built, and its cascaded transmission properties are investigated using optical cycle simulation. This is accomplished by optimizing the bidirectional pump power distribution to compensate the mode-dependent loss of FM-IWDM. The simulation shows that after ten cyclic transmissions, the DMG and OSNR of the entire system are about 0.56 dB and 27 dB, respectively, which applies to the long-distance transmission of DP-32QAM high-order modulation format signals.

Key words optical devices; erbium-doped fiber amplifiers; bidirectional pumping; simulation method; differential mode gain