

基于光子灯笼的模式功率检测方法

郭浩淼, 武保剑*, 江歆睿, 许焰, 文峰, 邱昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 644731

摘要 为了避免光子灯笼模式解复用器串扰对模式功率测量带来的误差, 提出基于单一模式计算方式的波长映射测量方法, 详细描述了其工作原理并研制出相应的模式功率检测单元。采用混合模式和单一模式两种计算方式, 分析了模式功率检测单元的透射率矩阵特点, 实验验证了波长映射测量方法的可行性。实验结果表明, 单一模式计算方式对少模光纤的偏振扰动不敏感, 其模式透射率的偏振相关性小于 0.025。在此基础上搭建了 1480 nm 前向泵浦的三模掺铒光纤放大器, 采用波长映射方法测试了三模同时放大的性能, 获得了高达 26 dB 的模式增益, 差模增益小于 2 dB。

关键词 光纤光学; 模式检测方法; 模式选择光子灯笼; 波长映射; 少模掺铒光纤放大器

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0106003

Detection Method of Mode Power Based on Photonic Lantern

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

Key Laboratory of Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 644731, China

Abstract To reduce the measurement error of mode power caused by the crosstalk in mode demultiplexers of photonic lanterns, we propose a wavelength mapping method based on single mode calculation. The operating principle of this method is described in detail, and the corresponding detection unit of mode power is developed. The transmittance matrix characteristics of the detection unit are analyzed in hybrid mode calculation and single mode calculation, respectively, and the feasibility of the wavelength mapping measurement method is verified by experiments. The experimental results show that single mode calculation is insensitive to the polarization perturbation in few-mode fibers, with the polarization dependence of mode transmittance less than 0.025. A three-mode erbium-doped fiber amplifier under 1480 nm forward pumping is built, and the wavelength mapping method is used to test the three-mode simultaneous amplification performance. The mode gain and differential mode gain are up to 26 dB and less than 2 dB, respectively.

Key words fiber optics; mode detection method; mode-selective photonic lantern; wavelength mapping; few-mode erbium-doped fiber amplifier

1 引言

为了不断提升光纤通信系统的容量, 波分复用和偏振复用等技术已得到广泛应用。然而, 受光纤非线性效应的影响, 目前单模光纤系统的通信容量已接近香农极限。基于空间维度复用的空分复用

(SDM) 技术可有效解决未来通信系统的扩容难题^[1]。例如, 模分复用(MDM)技术作为 SDM 技术之一, 可用不同的线偏振(LP)模式作为单独信道承载用户信息, 很好地解决了单模光纤(SMF)信道容量受限的问题。少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)是长距离 MDM 传输系统必不可少的光子器件^[2-3]。

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-06-21; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)

通信作者: *bjwu@uestc.edu.cn

在 MDM 系统中,较大的模式功率差将导致系统容量下降、中断概率升高。因此,要求少模掺铒光纤放大器具有模式增益均衡的功能。如何准确测量不同模式的增益至关重要^[4],目前有两种测量方法。一种方法是将各个模式信号解复用出来后再进行测量,例如文献[5]采用偏振分束器分离两个模式的信号,文献[6-7]采用相位板分离六模信号,文献[8-9]采用空间光调制器分离六模信号;另一种方法是使用波长映射测量法,利用光谱仪测量各个模式的功率^[10-13]。由于大多数光谱仪所承受的功率有限,可使用空间二色板将泵浦光和信号光分开,再使用光谱仪测量各个模式的功率。

模式选择光子灯笼(MSPL)复用/解复用器可以实现单模信号到高阶模式的转换,有效地解决了空间结构复杂的问题^[14]。令人不是很满意的是,现阶段光子灯笼还存在较大的模式串扰,串扰大小依赖于输入单模信号的偏振状态。本文针对基于 MSPL 的 FM-EDFA,提出一种模式功率检测方法——波长映射测量法,它通过波长来识别不同的模式,即通过在 MSPL 后面增加波分复用器的方式,解复用出每个 MSPL 单模输出端口的所有信号模式,然后根据解复用信号中各个模式的成分计算出 MSPL 少模输入端口每个模式的总功率。基于波长映射的模式功率检测方法消除了 MSPL 引起的模式串扰劣化,可分析模式复用光中各个模式所占的功率比例,能够准确地测量 FM-EDFA 的模式输出功率和增益。

本文提出基于单一模式计算方式的波长映射测量方法,描述了其工作原理并研制出相应的模式功率检测单元。通过搭建光子灯笼模式复用实验平

台,对波长映射测量法的可行性进行验证,并从偏振敏感性、光子灯笼串扰影响、映射波长选择和模式可升级性 4 个方面对波长映射测量法的适用性进行讨论。最后搭建了一个 1480 nm 前向泵浦的三模掺铒光纤放大器,并采用单一模式计算方式的波长映射测量方法测试了三模同时放大的性能,获得了高达 26 dB 的模式增益,差模增益(DMG)小于 2 dB。

2 波长映射模式功率检测方法原理

2.1 波长映射方法

基于 MSPL 的 FM-EDFA 中,直接测量 MDM 信号中的模式成分或者较为纯净地分离模式复用信号中的各个模式,都不是容易的事情。光子灯笼是一种连接单个多模波导与多个单模波导的低损耗器件,一般由低折射率玻璃套管中的多根单模光纤绝热拉锥而成^[15]。光子灯笼有模式选择性和非模式选择性两种,非模式选择光子灯笼由相同的标准单模光纤在一条低折射率的毛细玻璃管中绝热拉锥形成,MSPL 可使不同单模光纤的入射光激发出相应的独立模式^[16-17]。本文提出基于波长映射的模式功率检测方法,将模式与波长一一对应,即将模式的解复用转化为波长的解复用,或通过检测不同的波长成分来检测不同的模式。

为了便于描述波长映射测量法原理,选用具有三个单模端口的 MSPL 与密集型波分复用器(DWDM)制作三模式功率检测单元,其原理图和实物图分别如图 1(a)、(b)所示。偏振控制器用于调节复用信号的偏振状态,研究模式功率检测单元对偏振的敏感性。假设三模复用信号中 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式的波长分别为 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 。光子灯笼的制

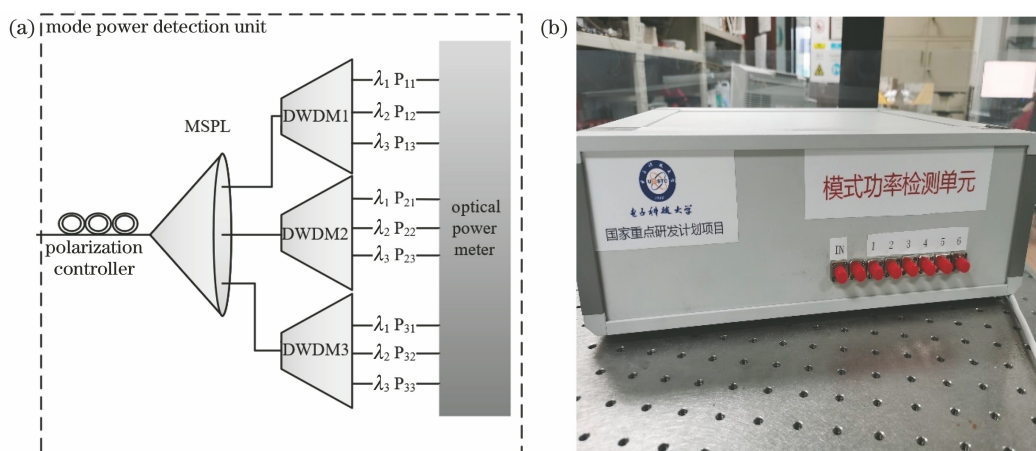


图 1 三模式功率检测单元。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Three-mode power detection unit. (a) Schematic diagram; (b) prototype

作过程中存在的光纤直径不匹配、光纤的拼接扭转弯曲或少模光纤对接等情况,均会在模式转换过程中造成模式串扰和传输损耗^[18-19]。对应不同波长的三个模式复用信号从 MSPL 的少模端注入到光子灯笼,然后转换成单模从 MSPL 的单模端输出。由于模式串扰的存在,每个单模输出端口都或多或少地包含三个波长成分。使用 DWDM 对这三个波长成分加以分离,在模式功率检测单元中使用 DWDM 有如下好处:1)通过密集型波分复用器滤除泵浦波长;2)使用 DWDM 可以代替昂贵的光谱分析仪进行增益测量;3)DWDM 比一般的光谱分析仪承受更大的功率。即使不同波分复用器的插入损耗有差异,也不影响结果的可靠性,这种差异已经在传输矩阵或透射率分析中加以考虑并补偿。根据每个 DWDM 输出的不同波长信号功率,可采用混合模式和单一模式的功率计算方式。

2.2 混合模式的功率计算方式

混合模式的功率计算方式根据每个 DWDM 解复用的所有波长信号(或模式)的功率和来计算少模复用信号每个模式的功率。设 P_{01} 、 P_{11a} 和 P_{11b} 表示待测复用信号中 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 信号的功率。 $P_1 \sim P_3$ 分别为 DWDM1 ~ DWDM3 解复用的所有波长信号功率之和,它们之间的功率转移表达式为

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{01} \\ P_{11a} \\ P_{11b} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: t_{i1} ($i = 1, 2, 3$)表示只有 LP₀₁ 模式注入该模式功率检测单元时 DWDM1 ~ DWDM3 的功率透射率, t_{i2} 和 t_{i3} 分别对应于 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式单独输入的情形下的功率透射率。由(1)式可知,只要测得每个 DWDM 所有输出端口的功率之和 P_m ($m = 1, 2, 3$),即可计算出复用信号中每个模式的输入功率。显然,对于 M 个模式的复用情形,需要测量 M^2 个透射率元素。混合模式功率计算本质上相当于 MSPL 转移矩阵的计算。

2.3 单一模式功率计算方式

混合模式功率计算方式是通过 MSPL 输出端口的总功率求模式功率,且对不同模式的功率分配比较敏感,测试过程中必须保证所标定的转移矩阵保持不变。为了简化分析,提出单一模式功率计算方式,它由同一模式的总功率计算待测复用信号中的模式功率。在模式功率检测单元中,将三个

DWDM 输出的相同波长信号的功率相加,所得到的总功率分别用 P'_n 表示, n 的取值 1, 2, 3 分别对应三个模式。由(1)式可知, P'_n 与输入模式功率之间有如下关系:

$$\begin{cases} P'_1 = (t_{11} + t_{21} + t_{31})P_{01} = t_1 P_{01} \\ P'_2 = (t_{12} + t_{22} + t_{32})P_{11a} = t_2 P_{11a}, \\ P'_3 = (t_{13} + t_{23} + t_{33})P_{11b} = t_3 P_{11b} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $t_n = t_{1n} + t_{2n} + t_{3n}$ ($n = 1, 2, 3$)表示相应模式的透射率,对应(1)式中转移矩阵的列向量元素之和。若已知模式检测单元对不同模式的透射率 t_n ,通过同一波长的总功率便可计算出待测复用信号中每个模式的功率。

3 波长映射测量法可行性实验验证

为了验证波长映射测量法的可行性,搭建了实验验证平台。整个实验装置主要由基于 MSPL 的模式复用器与模式功率检测单元组成。其中,模式复用器用于激励不同的模式;模式检测单元由 MSPL 解复用器(PHOENIX)与频率间隔为 200 GHz 的 DWDM 组成,用于检测各个模式的功率。由于 MSPL 模式激励与输入信号的偏振状态有关,利用偏振控制调节不同波长单模信号的偏振状态,将单模信号从 MSPL 的三个输入端口注入,模式转换后得到的模式复用信号由 MSPL 的少模端输出,并注入到模式功率检测单元进行模式功率测量。

实验中,LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式的光波长分别为 1551.3, 1549.233, 1553.044 nm。调节输入到 MSPL 单模端的光偏振态,用红外相机分别观察 MSPL 少模端光场的模式分布,直到能够激励出较为纯净的高阶模式信号光,如图 2 所示。

检测模式功率之前,需要对模式功率检测单元的功率转移矩阵进行测量。分别将功率为 -10 dBm 的 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式单独注入到模式功率检测单元,得到功率转移矩阵为

$$\mathbf{T} = (t_{ij})_{i,j=1,2,3} = \begin{pmatrix} 0.186 & 0.025 & 0.0075 \\ 0.0185 & 0.271 & 0.013 \\ 0.00025 & 0.023 & 0.252 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

接下来,比较混合模式和单一模式两种功率计算结果的差异。三个模式的信号光同时注入到 MSPL,并通过改变其中一个模式功率的方式考察计算误差大小的变化,如图 3 所示。

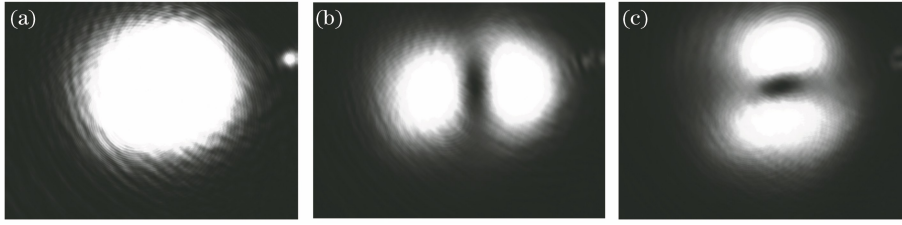
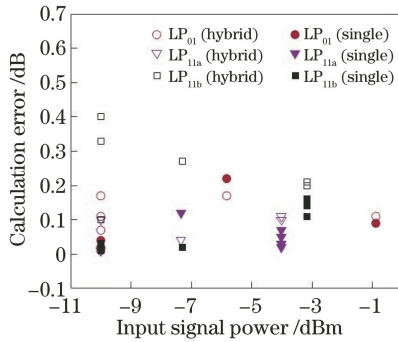
图 2 MSPL 激励的 LP 模式。(a) LP_{01} ; (b) LP_{11a} ; (c) LP_{11b} Fig. 2 LP modes excited by MSPL. (a) LP_{01} ; (b) LP_{11a} ; (c) LP_{11b} 

图 3 改变信号输入功率时两种计算方式得到的功率检测误差

Fig. 3 Power detection error measured in two calculation ways by changing input power of signal

图 3 中圆形、三角形和方形标记分别表示 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式，空心点和实心点分别表示混合模式计算方式的误差和单一模式计算方式的误差。由图 3 可知，两种计算方式给出的结果与实际输入功率基本一致，略有高估。混合模式和单一模式的功率计算方式对应的最大误差分别为 0.4 dB 和 0.22 dB。实验中将单一模式功率计算方式的结果与光谱分析方法的结果进行了对比，两者相差不到 0.5 dB。进一步的研究表明，混合模式功率计算过程中，三个模式功率差异较大时，会产生更大的误差；单一模式功率计算过程中，不同模式的功率不会互相产生影响，计算误差相对稳定。

4 波长映射模式功率检测方法适应性分析

本节将从偏振敏感性、光子灯笼串扰影响、映射波长选择和模式可升级性 4 个方面分析波长映射测量法的适应性。

1) 偏振敏感性

单一模式功率计算方式是通过计算 MSPL 所有端口中相同波长的功率和来获得各个模式信号的透射率，进而计算复用信号中模式的功率。混合模式功率计算方式是通过测量 MSPL 每个端口中所

有波长的功率来确定功率转移矩阵的，然后根据功率转移矩阵计算复用信号中各个模式的功率。由于模式功率检测单元中 MSPL 具有偏振敏感性，当各个模式的输入功率不变时，调节模式检测单元中的偏振控制器，其功率转移矩阵也会发生变化。重新测定其功率转移矩阵，并考察偏振对波长映射方法检测结果的影响。(2) 式中，模式透射率 t_n 的测量结果如图 4 所示，横坐标表示几种不同的偏振控制器状态。可见，功率转移矩阵每一列的和基本不随偏振控制器状态的改变而改变， t_1 、 t_2 和 t_3 的最大标准差（即模式透射率的偏振相关性）分别为 0.017, 0.012, 0.022。换句话说，与混合模式功率计算方式相比，单一模式功率计算方式中，模式功率检测单元输入端口的少模光纤偏振变化对透射率 t_n 的值影响很小，这种特性在实际中更具实用性价值。

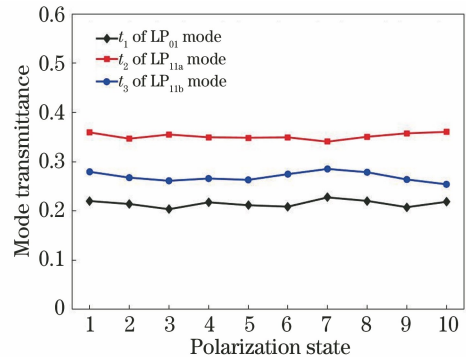


图 4 不同偏振状态下的模式透射率曲线

Fig. 4 Mode transmittance curves for different polarization states

2) 光子灯笼串扰的影响

波长映射测量法实质上就是为了解决复用光子灯笼的模式串扰问题，原则上讲，模式功率检测单元中也可以采用模式串扰更大的非模式选择光子灯笼，从而大大地减小模式功率检测单元的成本。然而，在标定波长映射测量法的功率转移矩阵时，用于激发高阶模式的 MSPL 模式串扰应尽可能小，可采用空间光调制器或相位板来获得纯净的高阶模式信号光。

3) 映射波长间隔选择

模式功率检测单元中的核心器件是 MSPL 与 DWDM,其中 DWDM 用于分离不同波长的单模信号。因此,应在 DWDM 工作波段内选择模式信号对应的波长。另一方面,由于 FM-EDFA 增益的波长依赖性,模式的波长间隔应尽可能小。

4) 模式可升级性

本文搭建了三模式功率检测单元,随着复用模式的增加,所需要的 DWDM 数目也会增加。可以使用光开关解决这个问题,即利用光开关切换 MSPL 与 DWDM 的连接端口,实现同一个 DWDM 对光子灯笼所有单模端口的测量。

5 FM-EDFA 模式增益的测量

波长映射测量法在 FM-EDFA 的优化过程中十分有用,下面使用模式功率检测单元对自行研制和优化的小差模增益的三模 FM-EDFA 的增益性能进行测试。所研制的三模 EDFA 是这样实现的:

单模信号通过三模 MSPL 激发出模式复用信号,模式复用信号与泵浦光被同时注入到三模 EDF 中进行放大,FM-EDF 输出模式采用基于光子灯笼的模式功率检测方法进行测量。实验系统如图 5 所示,只需在可行性验证实验的基础上增加泵浦激光器、信号/泵浦光波分复用器(WDM)和少模掺铒光纤(FM-EDF)。模式检测单元中的 DWDM 会滤除泵浦光,在 FM-EDF 后面无需再使用解复用器分离泵浦光和信号光。与波长映射测量法的验证实验相同,LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 信号波长分别为 1551. 3, 1549. 233, 1553. 044 nm;为了尽可能地减小差模增益,采用 LP_{11a} 和 LP_{11b} 两个模式的 1480 nm 泵浦光联合向前泵浦。FM-EDF 的长度为 3.2 m,其折射率分布如图 5 所示。实验前,调节 LP_{11a} 和 LP_{11b} 信号光的空间模场,使其与泵浦光的相应模场最大程度地重叠。FM-EDFA 的模式增益由 $G = 10\lg(P_{out}/P_{in})$ 计算,其中 P_{in} 表示各个模式信号光进入 FM-EDF 的功率, P_{out} 表示经 FM-EDFA 放大后的输出模式功率。

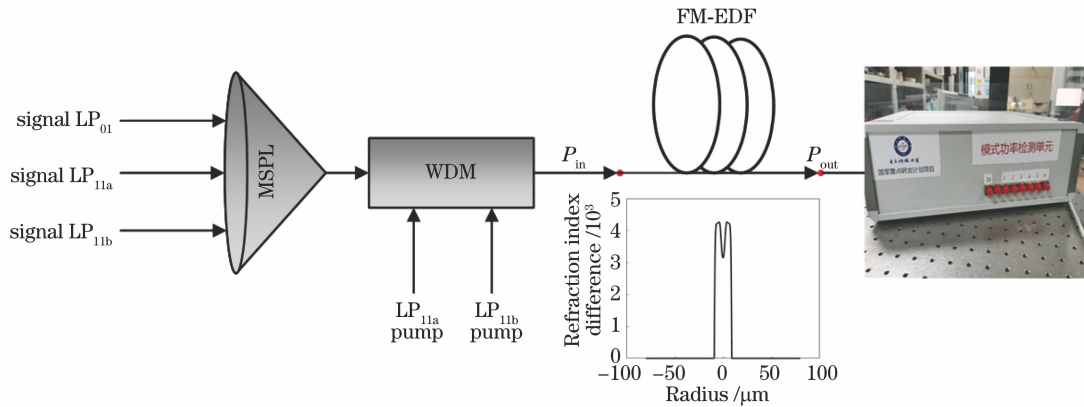


图 5 FM-EDFA 的三模放大实验系统

Fig. 5 Experimental system of three-mode optical amplification for FM-EDFA

首先,用 MSPL 分别在少模端激发出光功率为 -15 dBm 的 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式,用于校准和测量。所用模式功率检测单元的功率转移矩阵为

$$\mathbf{T} = (t_{ij})_{i,j=1,2,3} = \begin{pmatrix} 0.1247 & 0.0344 & 0.0414 \\ 0.0401 & 0.1541 & 0.0604 \\ 0.0685 & 0.0587 & 0.1064 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

实验中采用单一模式功率计算方式精确测量 FM-EDFA 放大后的输出模式功率。由(4)式可知,LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 的透射率分别为 $t_1 = 0.2333$, $t_2 = 0.2472$ 和 $t_3 = 0.2082$ 。

然后将三路信号光与两路泵浦光复用在一起,将复用信号注入 FM-EDF 中。LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b}

模式信号的人纤功率均固定在 15 dBm,为了确定 FM-EDF 各个模式的增益和差模增益,采用波长映射测量法的单一模式功率计算方式测量和计算 FM-EDF 放大后各个模式的功率。本实验中输入到 FM-EDF 的 LP_{11a} 模式泵浦光的人纤功率 $P_1 = 24.17$ dBm,调节 LP_{11b} 泵浦光的人纤光功率 P_2 。

最后改变 LP_{11b} 泵浦光功率 P_2 ,用模式功率检测单元测量 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 三个模式信号的输出光功率,模式增益 G 及其差模增益的实验曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:1) LP_{11a} 泵浦光功率 P_1 固定在 25.17 dBm 时,LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 信号模式增益随着 LP_{11b} 泵浦光功率 P_2 的增加而增加;2)当 P_2

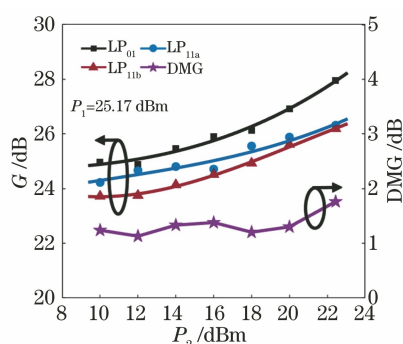


图 6 模式增益和 DMG 随 LP_{11b} 泵浦光功率的变化曲线

Fig. 6 Variations of modal gain and DMG with LP_{11b}-mode pump power

达到 22.4 dBm 时, LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 的模式增益分别达到 28.0 dB、26.3 dB 和 26.2 dB; 3) 在实验范围内, 差模增益均小于 2 dB。

6 结 论

为了避免光子灯笼模式解复用器串扰对模式功率测量带来的影响, 提出基于单一模式计算方式的波长映射测量方法, 并设计实现了基于 MSPL + DWDM 的模式功率检测单元。比较了混合模式和单一模式两种计算方式, 实验验证了波长映射方法的可行性。研究表明, 单一模式计算方式对少模光纤的偏振扰动不敏感, 模式透射率的偏振相关性小于 0.025。采用单一模式计算方式的波长映射测量方法, 对 1480 nm 前向泵浦的三模 FM-EDFA 放大性能进行了实验测试, 当 LP_{11a} 和 LP_{11b} 泵浦光功率分别为 25.17 dBm 和 22.4 dBm 时, LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 的模式增益分别可达到 28.0 dB、26.3 dB 和 26.2 dB; 在图 6 所示泵浦功率范围内, 差模增益均小于 2 dB。

参 考 文 献

- [1] Zhang S X, Liu J F, Zeng X Y, et al. A modified partitioned frequency domain equalization algorithm for 3-LP mode multiplexed systems with few mode fibers[J]. *Optik*, 2021, 229: 166291.
- [2] 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.
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.
- [3] Sabitu R I, Khan N G, Malekmohammadi A. Mode

conversion based on tilted-few-mode fiber assisted by dual arc waveguide for mode-division multiplexing system[J]. *Optik*, 2021, 226: 165880.

- [4] Zhang Z Z, Guo C, Zhang Y C, et al. Gain-equalized remotely pumped few-mode fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006004.
张振振, 郭骋, 张一弛, 等. 增益均衡的远程遥泵少模光纤放大器[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006004.
- [5] Jung Y, Alam S, Li Z, et al. First demonstration and detailed characterization of a multimode amplifier for space division multiplexed transmission systems [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B952-B957.
- [6] Jung Y, Kang Q, Sleiffer V A J M, et al. Three mode Er³⁺ ring-doped fiber amplifier for mode-division multiplexed transmission [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10383-10392.
- [7] Jung Y, Lim E L, Kang Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29008-29013.
- [8] Nasiri Mahalati R, Askarov D, Kahn J M. Adaptive modal gain equalization techniques in multi-mode erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(11): 2133-2143.
- [9] Zhang Z Z, Guo C, Cui L, et al. All-fiber few-mode erbium-doped fiber amplifier supporting six spatial modes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100604.
- [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]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [11] Lopez-Galmiche G, Sanjabi Eznaveh Z, Antonio-Lopez J E, et al. Few-mode erbium-doped fiber amplifier with photonic lantern for pump spatial mode control[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2588-2591.
- [12] Genevaux P, Simonneau C, Le Cocq G, et al. A five-mode erbium-doped fiber amplifier for mode-division multiplexing transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 456-462.
- [13] Zhang Z, Guo C, Cui L, et al. 21 spatial mode erbium-doped fiber amplifier for mode division multiplexing transmission[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1550-1553.
- [14] Wang Y L, Zhang C, Fu S N, et al. Design of elliptical-core five-mode group selective photonic lantern over the C-band[J]. *Optics Express*, 2019,

27(20): 27979-27990.

- [15] Yang H, Chen Z L, Liu W G, et al. Recent progress in photonic lantern [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120002.
杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120002.
- [16] Shen L, Gan L, Huo L, et al. Design of highly mode group selective photonic lanterns with geometric optimization[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24): 7065-7069.
- [17] Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber transmission system based on photonic lanterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606008.
- 陈健, 黄青青, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的正交频分/模分复用 IM-DD 多模光纤传输系统[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606008.
- [18] Noordegraaf D, Skovgaard P M, Nielsen M D, et al. Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1988-1994.
- [19] Xie Y Q, Wu B J, Wen F. Influence of refractive index perturbation on mode extinction ratio in few-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306005.
谢艳秋, 武保剑, 文峰. 少模光纤中折射率微扰对模式消光比的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306005.