一种表征 EDFA 放大宽谱光源的噪声估测方法

姜昊琦,赵 栋,陈永超,洪广伟

(复旦大学 材料科学系,上海 200433)

摘 要:光纤放大器作为分布式光纤传感系统实现超长距离、超低损耗传输必不可少的光学器件,其噪声特性对于系统整体性能有着至关重要的影响。微分干涉型分布式光纤传感系统中必须使用宽谱光源,同时探测终端也需采用宽谱探测,因此研究 EDFA 在宽光谱系统中的噪声对于传感系统整体性能的提升有着重要意义。文中研究了 EDFA 增益对宽谱光源波长与功率的响应关系,得出了可描述这一关系的增益响应曲线,并依此提出了一种可表征 EDFA 放大宽谱光源的噪声的估测方法,总结了EDFA 放大宽谱光源时的噪声规律。

关键词: EDFA; 宽光谱; 噪声; 估测

中图分类号: TN253 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0717006

A noise estimation method for characterizing EDFA amplified broadband spectrum light source

Jiang Haoqi, Zhao Dong, Chen Yongchao, Hong Guangwei

(Department of Material Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Optical fiber amplifier is an indispensable optical device in distributed sensing system to realize ultra-long-distance, ultra-low loss transmission. The noise characteristics of amplifier have a vital impact on the overall performance of the distributed sensing system. In the differential interference distributed sensing system, the broadband spectrum light source must be used, and the detection terminal must also use the wide spectrum detection, so it was of great significance to study the noise of EDFA in the broadband spectrum distributed sensing system for the improvement of the overall performance of the sensing system. The response relation of EDFA gain to the wavelength and power of the broadband spectrum light source was studied in this paper, and the gain response curve that can describe this relation was obtained. Based on this curve, an estimation method that can characterize the noise of the broadband spectrum light source amplified by EDFA was proposed, and the noise rule of EDFA amplified broadband spectrum light source was summarized.

Key words: EDFA; broadband spectrum; noise; estimation

收稿日期:2019-02-05; 修订日期:2019-03-16

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB08031);上海市科委项目(17DZ2280600)

作者简介:姜昊琦(1994-),男,硕士生,主要从事光纤传感方面的研究。Email:16210300029@fudan.edu.cn

导师简介: 赵栋(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email:zhaodongfudan@163.com

0 引言

随着社会的不断发展,人们对于区域安防的需求不断增加,更加现代化、更加灵敏隐蔽的长距离、大范围安防技术受到了更多的重视与广泛的应用[1-4]。分布式光纤传感技术具有应用距离长、灵敏度高、环境适应性强、抗电磁干扰和隐蔽性高等特点,逐渐成为安全监控领域的研究热点[5-9]。

EDFA 作为分布式光纤传感系统实现超长距 离、超低损耗传输必不可少的光学器件,其噪声特性 对于系统整体性能有着至关重要的影响。基于微分 干涉原理的分布式传感系统[10-11]中必须使用宽谱光 源,同时探测终端也需采用宽光谱探测,与一般的光 纤干涉系统采用 1550 nm 窄带光源不同, EDFA 放 大宽光谱时无法利用其 C 波段的增益平坦区域,因 此在放大时会造成信号的畸变,无法使用传统的噪 声评价方法对其进行表征。宽谱信号光波长和光功 率对于 EDFA 中铒离子的跃迁存在竞争关系,因此 EDFA 对宽谱光源的放大机制及噪声影响非常复 杂,在无法精确描述其噪声影响机制的情况下,寻求 一种近似的噪声估测方法成为了更为现实有效的选 择。目前国内外对于这种系统中的噪声分析鲜有研 究, 文中首次研究了 EDFA 增益对宽谱光源波长与 功率的响应关系,得出了可描述这一关系的增益响 应曲线,并依此提出了一种 EDFA 放大宽谱光源的 噪声估测方法,总结了 EDFA 在宽光谱传感系统中 的噪声规律。

1 原 理

980 nm 泵浦光下, EDFA 实际是三能级系统, 但 铒离子在激发态上的停留时间极短因此迅速无辐射 跃迁转移到亚稳态上, 形成粒子束反转, 最终激发态 上的粒子束近似为零可忽略, 因此可以等效为二能 级系统来描述 EDFA 的工作过程。EDFA 中泵浦光、信号光、自发辐射光的功率传输方程分别为:

$$\frac{\mathrm{d}P_p}{\mathrm{d}z} = \pm P_p \Gamma_p (\sigma_{pe} N_2 - \sigma_{pe} N_1) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}P_s}{\mathrm{d}z} = P_s \Gamma_s (\sigma_{sc} N_2 - \sigma_{ss} N_1) \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}P_a}{\mathrm{d}z} = \pm P_a^{\pm} \Gamma_s (\sigma_{sc} N_2 - \sigma_{sa} N_1) \pm 2\sigma_{sc} \Gamma_s N_2 h v_s \Delta v \tag{3}$$

式中: N_1 、 N_2 分别表示能级粒子数密度;P 表示功率,当下标符号取值为s、p、a 时分别代表信号光、泵浦光、自发辐射光的功率;±表示光沿光纤传播方向的正反; σ_{sc} 、 σ_{sa} 分别表示信号光子的吸收和辐射系数; σ_{pc} 、 σ_{pa} 分别表示泵浦光子的吸收和辐射系数; Γ_p 、 Γ_s 分别表示泵浦光、信号光模场与纤芯掺杂区的重叠积分因子。

对于宽谱光源,不同波段的光功率对 EDFA 中 铒离子的跃迁存在竞争关系,此时信号光功率随波长变化,公式(2)中 P_s 项应表示为 $P_s(\lambda)$,而 EDFA 的 自发辐射噪声受信号光的影响产生的变化必须考虑,公式(3)中 P_a 须表示为 $P_a(\lambda)$,并且公式(3) $hv_a\Delta v$ 项仅表示信号光在窄带光源所处波长位置的光子能量,为一恒定值,而在宽谱光源中,该项应为随信号光波长改变的变量. 综上,EDFA 功率传输方程须改写为:

$$\frac{\mathrm{d}P_p}{\mathrm{d}z} = \pm P_p \Gamma_p (\sigma_{pe} N_2 - \sigma_{pe} N_1) \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}P_{s}(\lambda)}{\mathrm{d}z} = P_{s}(\lambda)\Gamma_{s}(\sigma_{se}N_{2} - \sigma_{sa}N_{1})$$
 (5)

$$\frac{\mathrm{d}P_a(\lambda)}{\mathrm{d}z} = \pm P_a^{\pm}(\lambda) \Gamma_s(\sigma_{sc}N_2 - \sigma_{ss}N_1) \pm 2\sigma_{sc}\Gamma_s N_2 \frac{hc^2}{\lambda^3} \Delta\lambda \quad (6)$$

EDFA 中由于自发辐射和信号同时同等程度消耗反转粒子得到放大,经滤波器去除残余的泵浦光后,EDFA 放大后的输出光功率表示为:

$$P_{\text{out}} = \alpha_{P_{s}(\lambda)}(P_{s}(\lambda) + P_{a}) \tag{7}$$

式中: $\alpha_{P,(\lambda)}$ 为随信号光变化的增益系数; P_a 为 $P_s(\lambda)=0$ 情况下 EDFA 的自发辐射功率,此时 $\alpha_0=1$, P_a 可视为理想情况下 EDFA 对信号光放大的增益曲线[12]。

在 $P_s(\lambda) \neq 0$ 时, P_a 随 $P_s(\lambda)$ 功率变化:随着 $P_s(\lambda)$ 的增大,其对于 EDFA 自发辐射的抑制作用越明显,在到达某数值时,EDFA 对宽谱光源的放大效果将无法提高,此时为 EDFA 的最佳信噪比工作状态。将此时的自发辐射噪声记为 P_a' ,公式(7)修正为:

$$\alpha_{P_s(\lambda)} = \beta_{P_s(\lambda)} \frac{P_a}{P_a'} = \gamma_{P_s(\lambda)} P_a \tag{8}$$

式中: $\gamma_{P_s(\lambda)} = \beta_{P_s(\lambda)}/P_a'$,将 $\gamma_{P_s(\lambda)}$ 作为 $P_s(\lambda) \neq 0$ 时的增益影响系数拟合曲线。在实际应用中,通过调整 EDFA 工作状态,得到 $\gamma_{P_s(\lambda)}$ 曲线后,通过公式(8)即可求得 $\alpha_{P_s(\lambda)}$,进而快速评估 EDFA 对宽光谱光源的放大噪声。

2 实验与拟合

实验结构如图 1 所示。由一个中心波长约为 1550 nm 的宽谱光源(如图 2 所示)、EDFA、980 nm 泵 浦光源及光谱分析仪组成。

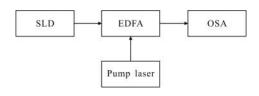


图 1 实验结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental structure

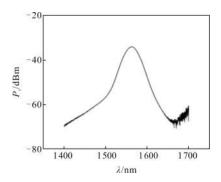


图 2 信号光光谱图

Fig.2 Signal light spectrum

在最佳信噪比工作状态时, $P_s(\lambda)$ 远大于 P_a ,公式(7)可以近似化简为:

$$P_{\text{out}} = \alpha_{P(\lambda)} P_s(\lambda) = \gamma_{P(\lambda)} P_a P_s(\lambda) \tag{9}$$

将实验测得的信号光光谱 $P_s(\lambda)$ 、EDFA 实际放大输出谱 P_{out} 、 $P_s(\lambda)=0$ 情况下 EDFA 的自发辐射谱 P_a 代入公式(9)即可求出不同 $P_s(\lambda)$ 下的的 $\gamma_{P_s(\lambda)}$ 拟合曲线,如图 3 所示。

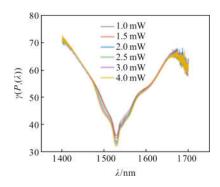


图 3 不同信号光功率下的增益影响系数曲线图

Fig.3 Gain influence coefficient curve under different signal optical powers

由图 3 可以看出,EDFA 增益影响系数拟合曲 线在高信号光功率情况下非常一致,这说明该曲线 确能反映宽谱光源对 EDFA 放大时的增益影响。

通过对实验室自制的 EDFA 工作状态的调整与实验,测得 4 mW 信号光条件下达到最佳信噪比状态,将此时的自发辐射噪声记为 $P_{a'}$ 。

以 $P_s(\lambda)=100 \, \mu W$ 时为例,将测得的增益影响拟合曲线 $\gamma_{(P_s(\lambda))}$ 、信号光 $P_s(\lambda)$ 与自发辐射曲线 P_a 代入公式(9),得到在不同泵浦电流 I_p 下的 EDFA 放大拟合曲线 P_{out} ,如图 4 所示。

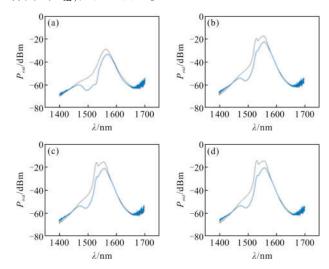


图 4 不同泵浦电流下的实测与估测曲线

Fig.4 Measured and estimated curves at different pump currents

图 $4(a)\sim(d)$ 分别代表在泵浦电流 I_p 为 200、400、600、800 mA 时 P_{out} 的实测与估测曲线,其中黑色为实测曲线,蓝色为估测曲线。可以看出,拟合所得的 EDFA 放大估测曲线与实测的 EDFA 放大曲线趋势相吻合。

3 分析与讨论

由图 4 可看出,在同一信号光功率下,输出光功率随泵浦功率的增大而增大,且在 1 530 nm 处逐渐出现明显峰,这是由于 EDFA 在该波长附近存在自发辐射峰值,增益响应较其余波段更明显。1 500 nm 和 1 530 nm 处,拟合放大曲线与实测放大曲线出现了较大差异,这是由于 EDFA 在该波段的自发辐射较大,作为拟合基准的高信号光功率条件下,此处的自发辐射被明显抑制,而在低信号光功率条件下,这两个波长附近的自发辐射噪声对最终输出光功率的影响较大。拟合曲线中增益响应较实测放大曲线要

平缓,说明该拟合方法滤去了 EDFA 部分自发辐射 噪声带来的增益响应。

对于宽谱光源,给出某单一波长下的信噪比是没有意义的.实验中为方便计算,令 $P_a'=0$ 从而可以认为两条曲线积分面积的差值 S_{noise} 为 EDFA 对宽谱光源放大过程中产生的噪声。定义 EDFA 放大宽谱光源时的噪声指数 n:

$$\eta = \frac{S_{\text{noise}}}{S_{\text{out}}} \tag{10}$$

式中: S_{out} 为输出功率实测曲线积分面积,噪声指数随泵浦光功率的变化如图 5 所示。

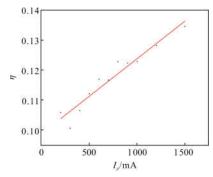


图 5 不同泵浦电流下的噪声指数 7

Fig.5 Noise index η at different pump currents

由图 5 可以看出,噪声指数 η 随泵浦光的增大 而增大,且大致呈线性关系。

该拟合方法中为方便计算,令 $P_a'=0$,而实际过程中 $P_a'\neq 0$,因此整体估算所得的噪声较真实值都偏大,即噪声指数 η 较真实值偏大。同时由于拟合方法降低了在 $1500\,\mathrm{nm}$ 和 $1530\,\mathrm{nm}$ 附近由于自发辐射带来的增益响应,也会使得噪声指数 η 较真实值偏大。

为验证这种估测方法的普适性,笔者在宽谱光源之后加了一个中心波长为1553.3 nm、-3 dB 带宽为1 nm 的光纤光栅,如图 6 所示。将加光纤光栅之

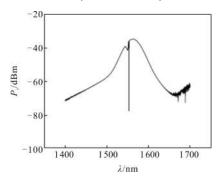


图 6 加光栅后的信号光光谱图

Fig.6 Signal light spectrum after adding fiber grating

后宽谱光源的 $P_s(\lambda)$ 代入公式(9)进行拟合,结果仍然与实测放大曲线趋势吻合,如图 7 所示。这说明此种估测方法具有科学性和普适性。

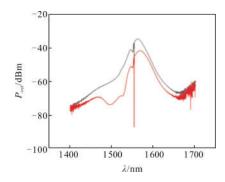


图 7 加光栅之后的实测与估测曲线

Fig.7 Measured and estimated curves after adding fiber grating

图 7 中黑色为加光栅后的 P_{out} 实测曲线,红色为 P_{out} 估测曲线。

4 结 论

通过研究 EDFA 增益对宽谱光源波长与功率的响应关系,得出了可描述这一关系的增益响应曲线。依此提出了一种 EDFA 放大宽谱光源的噪声估测方法,并给出了评价噪声水平的噪声指数 η。

实验结果显示该估测方法对不同的宽谱光源具有普适性;噪声指数 η 随泵浦光的增大而增大,且大致呈线性关系,这与 EDFA 放大窄带光源时的噪声特性相一致。

文中所提出的估测方法对于 EDFA 放大宽谱光源时的噪声特性研究有重要参考价值,并且对于提升宽谱微分干涉分布式传感系统整体性能有着重要意义。

参考文献:

- [1] Dong Xiaopeng, Zhen Junda. Multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 107-110. (in Chinese)
- [2] Zhang Ye, Jia Bo, Tang Huang, et al. Fiber-optic security system-application of a novel security system in campus construction [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(2): 177–180. (in Chinese)
- [3] Ou Jinping. Research and practice of smart sensor net works and health monitoring systems for civilin frastructures in

第 7 期 www.irla.cn 第 48 卷

- mainland China [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2005, 19(1): 8–12. (in Chinese)
- [4] Liu Xila. Funda mentalresear chonsafety and durability of major structure sincivil and hydraulic engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(6): 1–7. (in Chinese)
- [5] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors
 [J]. Optical Fiber Technology: Materials, Devices and Systems, 2003, 9(2): 57-79.
- [6] Hong X, Guo H, Jian W, et al. An intrusion detection sensor based on coherent optical time domain reflector [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 52 (12): 2746-2748.
- [7] Mohammadi M, Raahemi B, Akbari A, et al. New class-dependent feature transformation for intrusion detection systems [J]. Security & Communication Networks, 2012, 5 (12): 1296–1311.
- [8] Li Rongwei, Li Yongtao. Application of distributed opticalsen

- sorinsu bmarinecable detection [J]. *Telecom Munications for Electric Power System*, 2010, 31(2):45-48. (in Chinese)
- [9] Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin, et al. Research on novel distribute doptical fiber pipeline leakage detectionte chnology and location method [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 123–127.(in Chinese)
- [10] Xu Haiyan, Ai Xin, Wu Hongyan. Wavelet-based approach form odei dentification functionin the different ialinter ference sensor system [J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(4): 305–310. (in Chinese)
- [11] Tang Huang, Miao Xuan, Zhao Dong. Submarine listening based on fiber different ialinter ferometer [J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(2): 107–111. (in Chinese)
- [12] Yuan Shuzhong, Ge Chunfeng, Wei Zhenxing, et al. The STU dyongain flattening of EDFA [J]. Acta Scientiarum Naturaliun Universitatis Nankaiensis, 1999, 32(4): 117–118. (in Chinese)