

文章编号: 1001-3806(2013)04-0529-04

## 中间级接入掺铒光纤放大器及其自动增益校准

吴晓燕,任海兰\*

(武汉邮电科学研究院,武汉 430074)

**摘要:** 为了根据外界条件的变化自动进行增益调整,引入了中间级接入掺铒光纤放大器,它具有两级放大功能,增益在一定范围内可调,且能自动根据系统的变化调整自身的增益,使其满足不同条件的应用需求。采用自动增益校准的方法,对其原理进行了理论分析和实验验证,取得了中间级接入掺铒光纤放大器的增益校准及验证数据。结果表明,自动增益校准数据具有较高的准确性。这一结果对掺铒光纤放大器实现快速、准确的自动增益控制是有帮助的。

**关键词:** 光纤放大器;自动增益控制;自动增益校准;中间级接入

**中图分类号:** TN722      **文献标识码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.025

## Erbium-doped fiber amplifier with mid-stage access and automatic gain calibration

WU Xiao-yan, REN Hai-lan

(Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to adjust the gain automatically under different environmental conditions, an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with mid-stage access was introduced, which had two amplifier stages and variable gain within a certain range. To achieve the purpose of automatic gain adjustment, the method of automatic gain calibration was adopted. After theoretical analysis and experimental verification, the data of gain calibration and verification of the EDFA with mid-stage access were obtained. The results show that the data of automatic calibration has high accuracy. This research is helpful for EDFA to achieve automatic gain control rapidly and exactly.

**Key words:** fiber amplifier; automatic gain control; automatic gain calibration; mid-stage access

### 引 言

掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)在光网络、分配网络以及有线电视网中得到了广泛的应用,常用于功率放大、预放大以及线路放大,同时还用来对光无源器件的损耗进行补偿等<sup>[1]</sup>。EDFA 拥有较大的增益带宽,决定了它能将多个通路的光信号复用起来在线路上传输,并且它对光信号的传输速率和数据调制格式透明,使得光网络的传输容量、透明性和可靠性得到了显著改善,极大地加快了光纤通信系统尤其是密集波分复用系统的研发和商用化<sup>[2]</sup>。

随着密集波分复用技术的不断成熟,单个波长

的传输速率逐渐提升到 10Gbit/s ~ 40Gbit/s,色散因此成为决定无电再生中继传输距离的重要因素。常采用的改善色散的方法是在传输线路上增加色散补偿单元<sup>[3]</sup>,如色散补偿光纤和色散补偿模块等。一般有前置补偿和后置补偿两种方式,前置补偿方式由于所引入的器件插入损耗较大,会使线路的发送功率降低,而后置补偿方式需要对线路上的放大器设定相应的增益来补偿色散补偿单元的插入损耗,增加了系统设计的复杂性。因此,为了便于系统的管理并降低光纤通信系统的设计难度,引入了中间级接入(mid-stage access, MSA)增益可调 EDFA。

### 1 MSA 增益可调 EDFA 的性能分析

MSA 增益可调 EDFA 的光放大分为两级放大器来完成,这两级放大器为可调增益放大级 1 和可调增益放大级 2,其结构如图 1 所示。两级放大的增益可以在一定范围内进行调整<sup>[4]</sup>。输入光信号进入放大

作者简介:吴晓燕(1988-),女,硕士研究生,主要研究领域为光纤通信。

\* 通讯联系人。E-mail: renhl@wri.com.cn

收稿日期:2012-10-22;收到修改稿日期:2013-01-29

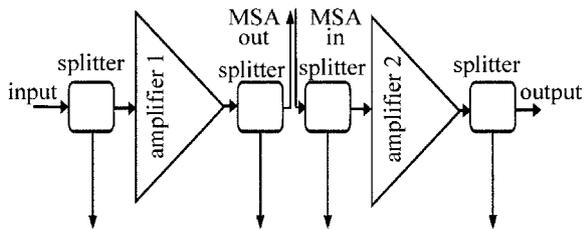


Fig. 1 Configuration of MSA

器的输入端,经过第 1 级放大后由 MSA 输出,在可变增益放大级 1 的 MSA 输出和放大级 2 的 MSA 输入之间有接入抽头,可用来接入进行色散补偿的色散补偿光纤 (dispersion compensating fiber, DCF)、色散补偿模块 (dispersion compensating module, DCM) 和光分插复用模块或者其它光模块。之后,信号光从 MSA 进入第 2 级进行再放大,此结构的 EDFA 对信号光进行了前后两次放大,不仅使 EDFA 具有较高的增益,同时还可以根据系统的应用需求 (如色散补偿) 在两级放大之间加入其它功能的模块或器件,改善了系统的性能,增强了灵活性。

对于单级结构的 EDFA 来说,其放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 噪声<sup>[5]</sup>为:

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)h\nu B \quad (1)$$

式中,  $P_{ASE}$  是目标增益为  $G$ 、信号光频率为  $\nu$ 、带宽为  $B$  范围内产生的放大自发辐射噪声,  $h$  为普朗克常量,  $n_{sp}$  为自发辐射因子。由 (1) 式可知,在输入光功率确定的情况下,信号光频率和带宽固定,只要目标增益  $G$  不变,其噪声功率  $P_{ASE}$  也不变,EDFA 的噪声指数也就不变。

而对于 MSA 增益可调 EDFA 来说,其相当于两台单级的 EDFA 进行级联,而且两级增益分别可调,只要增益改变,EDFA 的噪声指数<sup>[6]</sup>  $F_n$  就会发生变化。MSA 增益可调 EDFA 等效噪声指数可表示为:

$$F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2} \cdot T - 1}{G_1} \quad (2)$$

式中,  $F_{n1}$  和  $G_1$  为可调增益放大级 1 的噪声指数和增益,  $F_{n2}$  为可调增益放大级 2 的噪声指数,  $T$  为常数。由 (2) 式可知,只要有一级 EDFA 的噪声指数  $F_{n1}$  或  $F_{n2}$  发生变化,整个 EDFA 的噪声指数  $F_n$  就会发生相应的变化。为了使整个 EDFA 的噪声指数尽量保持在最佳状态,在满足 EDFA 系统应用要求的前提下,应尽量提高 MSA 增益可调 EDFA 前级增益  $G_1$  的大小,这样就能够极大地降低 EDFA 的整体噪声指数。因此,如果可调增益放大级 1 有足够大的增益,则 EDFA 的噪声系数将主要由第 1 级放大器

来决定,只要降低第 1 级放大器的  $F_n$ ,整个系统的  $F_n$  就可以比较低。那么,可调增益放大级 2 的设计重点就是尽可能提高输出功率。这样结构的 EDFA 在低噪声指数以及高饱和输出功率方面具有明显优势<sup>[7]</sup>。在单级放大的情况下,还没有任何结构的 EDFA 能满足最大输出功率、最高增益、最低噪声指数和最佳谱线形状的要求。因此,对于 MSA 增益可调 EDFA 来说,两级放大选用何种结构必须由对模块性能起决定作用的参量来决定,且必须达成一个合适的折中性权衡<sup>[8]</sup>。

## 2 MSA 增益可调 EDFA 自动增益校准原理

本文中探讨的 EDFA 的自动增益校准,是通过输入、输出光功率的监控<sup>[8]</sup> 计算出 EDFA 的实际增益,并不断调整抽运激光器的数/模转换 (digital/analog conversion, DAC) 值,即抽运工作电流的采样值,使增益达到目标值。增益校准完成后,获取入光功率、目标增益与抽运 DAC 的对应关系<sup>[9]</sup>,并建立链表存入 EDFA 的内存中,作为 EDFA 自动增益控制的参考值。当 EDFA 进行自动增益控制时,通过查表获取当前入光功率及目标增益对应的 DAC 值,可直接调整抽运至此 DAC 并在此基础上做出微调,以便快速地锁定到目标增益,极大地简化 EDFA 自动增益控制的流程。

选用 MSA 增益可调 EDFA 的光路如图 2 所示。在一个特定增益情况下,其中间级增益是一个固定值,抽运 1 保证中间级的增益达到要求值,而抽运 2 则用来调整整级的增益值,可调光衰减器 (variable optical attenuator, VOA)  $VOA_2$  对于某个固定增益来说是一个定值,它的作用是限制中间级的输出功率,可调光衰减器 1 根据 EDFA 的工作状态进行调整,可以用来优化 EDFA 的增益平坦度<sup>[10]</sup>  $F_g$ ,使增益保持平坦。

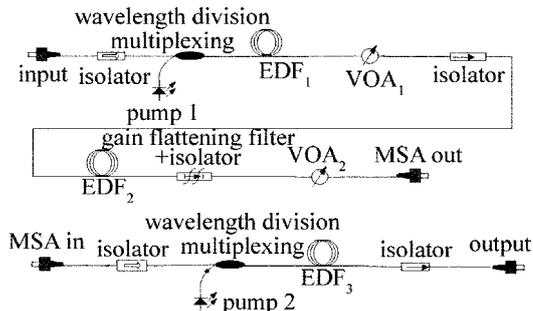


Fig. 2 Optical schematics of EDFA module

对某一特定增益点的校准需要分别在其输入光功率为最大和最小的情况下,找到抽运 1、抽运 2 的

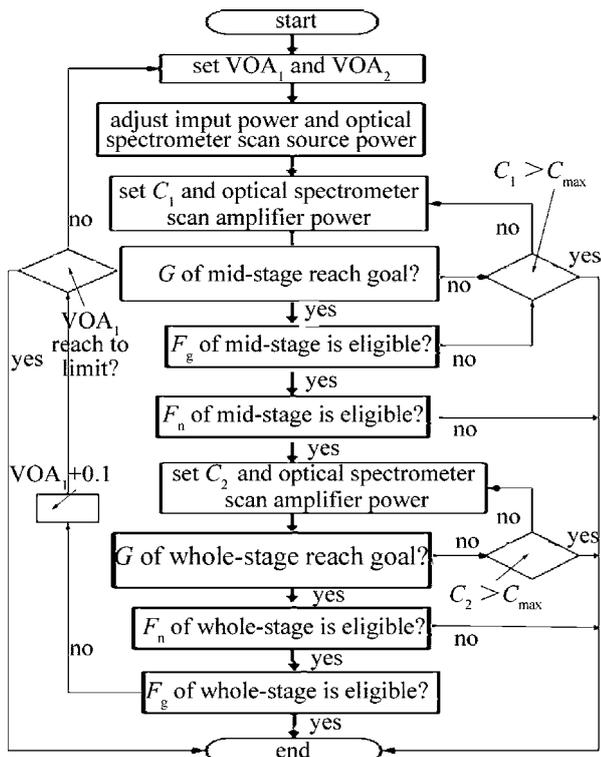


Fig. 3 Flow chart of automatic gain calibration

DAC 值,然后通过线性插值<sup>[11]</sup>的方式得出各种输入光情况下的抽运 1 和抽运 2 的 DAC 值。在 EDFA 模块的增益可调范围内,需要按照 1dB 的间隔进行

增益的校准,但为了简化校准流程,一般只进行最大及最小增益的校准,其它各增益可以通过线性插值的方法进行拟合。具体校准流程如图 3 所示。图中, $C_1, C_2, C_{max}$  分别表示抽运 1, 抽运 2 的 DAC 值及 DAC 最大值。

该自动校准方法不仅能够根据输出信号的各项参量自动进行增益调整,而且还能对 EDFA 的其它参量,如增益平坦度和噪声指数等进行权衡优化。更重要的是,它还把 EDFA 的输入功率作为自我调节的依据,来调整 EDFA 的工作参量,以满足 EDFA 自动增益控制在不同条件的应用需要。

### 3 结果分析

为了验证以上自动增益校准原理的可行性,并验证基于校准数据的查表机制进行自动增益控制的准确性,开发了基于 VC++ 6.0 的 MSA 增益可调 EDFA 自动增益校准系统,并完成了图 2 所示结构的 EDFA 增益的自动校准和验证,选定目标增益为 38.2dB,入射光功率为 -15.4dBm 的增益校准及验证结果如表 1 所示,入射光功率为 -34.8dBm 的增益校准及验证结果如表 2 所示。表中, $I_1$  和  $I_2$  分别表示抽运 1 和抽运 2 的电流值。

Table 1 Result contrast between gain calibration and verification in high input

parameter	$C_1$	$C_2$	gain/dB	input/dBm	$F_g$ /dB	$F_n$ /dB	ASE/dB	$I_1$ /mA	$I_2$ /mA
calibration	5054	10571	38.19	-15.40	0.85	4.11	0.17	257.5	876.9
verification	5123	10487	38.12	-15.39	0.94	4.13	0.26	260.8	870.6
accuracy	42	84	0.07	0.01	0.09	0.02	0.09	3.3	6.3

Table 2 Result contrast between gain calibration and verification in low input

parameter	$C_1$	$C_2$	gain/dB	input/dBm	$F_g$ /dB	$F_n$ /dB	ASE/dB	$I_1$ /mA	$I_2$ /mA
calibration	1198	1027	38.13	-34.80	1.11	4.53	7.72	61.9	88.0
verification	1198	1034	38.08	-34.81	1.26	4.65	7.66	61.9	88.0
accuracy	0	7	0.05	0.01	0.13	0.12	0.06	0	0

由表 1 和表 2 可以看出:

(1) 高光下校准的实际增益与目标增益 38.2dB 的偏差为 0.01dB,低光下校准的实际增益与目标增益的偏差为 0.07dB,能达到校准的目标增益。

(2) 增益验证时,EDFA 根据自动校准的结果查找目标增益 38.2dBm 对应的抽运 DAC 值并进行微调来自动控制增益,高光下锁定的实际增益与校准增益偏差为 0.07dB,低光下实际增益与校准增益的偏差为 0.05dB,由此可见自动增益校准的结果具有较高的准确性,通过查找自动校准的结果,EDFA 能准确地锁定到目标增益。

(3) 虽然高光下校准的抽运 DAC 值与验证反馈的抽运 DAC 值精度较大,但它所引起的增益偏差仅有 0.07dB,而低光下  $C_2$  值的偏差仅为 7,而引起的增益差为 0.05dB。这是由于低光下,抽运 DAC 较小,其微小的改变即能引起增益的较大改变,而高光下随着抽运 DAC 值的增加,增益趋于饱和,抽运 DAC 值的改变所能引起的增益变化很小。

(4) 增益校准时,对于 EDFA 的  $F_g$  和  $F_n$  进行了权衡优化,使其能满足产品的要求,验证时,EDFA 自动锁定增益后  $F_n, F_g$  的结果也能很好地满足要求,能很好地保证 EDFA 的工作性能。

(5)高、低光的校准数据与验证反馈数据基本相同,各项指标偏差很小,能很好地满足 EDFA 自动增益控制的要求。

#### 4 结 论

随着智能光网络技术的不断发展,对网络的智能化程度要求也越来越高。鉴于 MSA 增益可调 EDFA 配置的灵活性以及其在网络管理中的灵活性,它将会逐步取代传统的固定增益 EDFA。增益均衡技术加上增益可调结构,可极大地改善 EDFA 的增益平坦特性;配合色散补偿模块及色散补偿光纤的使用,可进一步改善色散对高速线路的影响。可以预见,MSA 增益可调光放大技术将会在不远的将来得到更加广泛的应用。

#### 参 考 文 献

- [1] MA X M. Optimum fiber length of two-stage EDFAs[J]. Laser Journal,2003,24(4): 18-19(in Chinese).
- [2] ZHENG Y F,CAI X L,ZHANG Ch L,*et al.* Optical fiber communication technology [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006:56-62(in Chinese).
- [3] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004:281-288(in Chinese).
- [4] WANG H Q,YANG Zh. Application of variable gain EDFA with MSA in WDM systems [J]. Study on Optical Communications, 2007,33(1): 27-30(in Chinese).
- [5] HAN Q,NING J P,ZHOU L. Impact of ASE on high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 541-544(in Chinese).
- [6] BOUZID B. Performance tendency of gain and noise figure at different EDFA configurations [J]. Journal of Electronic Science Technology of China,2010,8(1):74-77.
- [7] WANG X,DING L. Automatic gain control of EDFA cascades in WDM systems [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(10):1038-1042(in Chinese).
- [8] CHENG H X,DU J. The research of EDFA's gain clamping technology [J]. Optical Communication Technology,2002,26(4):10-14(in Chinese).
- [9] CHEN H,ZHU Y Q,ZHAO L L. Effect of input signal power on EDFA gain slope [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2003, 14(10):1038-1042(in Chinese).
- [10] HUANG X Z,HUANG D X. C-band EDFA cascades and gain lock [J]. Study on Optical Communications,2000,26(4):31-34(in Chinese).
- [11] HAN J. Study on automatic gain control of erbium-doped fiber amplifiers [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008: 37-39(in Chinese).