

文章编号: 0258-7025(2001)03-0265-04

用于级连 EDFA 增益谱平坦的滤波器 透过谱设计的迭代算法

肖艳红 厉群 韩岩 刘小明 彭江得

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 针对在两段掺铒光纤中插入滤波器实现宽带(35 nm)增益平坦的滤波器透过谱的设计问题,提出了一种新的迭代算法。其原理是利用放大器的均匀展宽特性和级连放大器自动增益补偿的特性。在每次迭代中,都取要求带宽内增益(分贝数)的平均值为参考轴,在增益比该轴高的波长范围内再附加一与增益谱反对称的损耗谱。而增益低于参考值的波长处则会得到自动的增益补偿。模拟计算结果表明,用该方法得到的滤波谱能使放大器的增益平坦在原放大器可能得到的最高增益水平,同时因滤波器的引入带来的噪声特性恶化也最小。

关键词 掺铒光纤放大器(EDFA) 增益谱平坦 滤波器

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

An Iterative Algorithm for Transmission Function Designing of Gain Flattening Filters

XIAO Yan-hong LI Qun HAN Yan LIU Xiao-ming PENG Jiang-de

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In broadband(35 nm)EDFAs, gain flattening filter can be inserted between the two stages of EDFs. In this paper, an iteration algorithm for designing the filter's transmission function is proposed. The principle of this algorithm is taking the advantages of homogeneous broadening and gain compensation between two stages. In each iteration step, the average gain level is taken as reference, and within the wavelength range where the gain is higher than the reference, an inverse gain spectrum is used to modify the transmission function. Then the gain within other wavelength range will be compensated automatically. Simulation results show that by using this iteration algorithm, the flattened gain can reach the possible highest value of the original amplifier, and noise penalty is the minimum.

Key words erbium doped fiber amplifier, gain spectrum flattening, filter

1 引言

随着通信容量的急剧增长, WDM 系统中的信道数越来越多,对放大器的放大带宽提出了相应的要求。普通掺铒光纤放大器通过对结构参数的优化设计所能得到的平坦带宽由光纤本身的吸收和发射系数决定。对于目前典型的商用光纤,1 dB 平坦带宽不超过 17 nm^[1]。要实现平坦带宽超过 30 nm 的宽带放大器,必须引入增益均衡元件。比如,在放大器的输出端引入一个滤波谱与放大器增益谱反对称的光滤波器。这种方法虽然简单,但滤波器引入的损耗造成的功率代价较大。另一种方法是在放大器的

两段光纤之间插入均衡滤波器^[2],这种方法利用级连放大器的增益自动补偿作用,可以减少损耗引入的代价。但是,由于掺铒光纤的均匀展宽特性,任何波长处损耗的引入将引起其他各波长增益的变化。因此,为了以尽可能小的代价得到足够好的增益均衡特性,均衡器滤波谱的形状需要通过仔细的模拟计算进行设计。本文将讨论这样的滤波谱的设计问题。理论和实验已经充分证明,对于一个没有锁定增益的放大器,即使放大器的结构参数(光纤长度、抽运波长及功率等)已经固定,在不同输入信号条件下所需要的滤波谱也是不同的。本文研究得出,在结构参数和输入均固定的前提下,存在多种滤波谱形,它们都可以使原放大器在一个指定的带宽内具有平坦的增益谱,只是平坦后的增益水平不同,而且

放大器的噪声系数也不同,其中存在一个损耗最小的滤波谱,它对应最高的增益水平和最小的噪声系数。本文将分析存在多种滤波谱的物理原因并介绍得到此最佳滤波谱的迭代算法。

2 算法原理分析

当一台放大器的结构参数(光纤长度、抽运波长及功率、内插元件等)一定,输入信号也一定时,其增益谱就确定了。这时频率 ν_k 处的增益可表示为^[3]

$$G_k(\text{dB}) = \left[(\alpha_k + g_k) \frac{\overline{n_2}}{n_1} - \alpha_k \right] L + \text{Loss}_k(\text{dB}) \quad (1)$$

其中 $\overline{n_2}/n_1$ 为整个光纤长度上的平均粒子数反转水平, α_k, g_k 分别为光纤在频率 ν_k 处的吸收和发射系数, L 为光纤总长, Loss_k 表示其他元件(包括均衡滤波器)在频率 ν_k 处的总损耗。对于一台均衡器置于输出端的放大器(1)式的第一项表示未加均衡器前放大器的本征增益谱。该增益谱的形状由粒子反转水平决定,不同反转水平下,增益峰的位置以及峰值大小都可能不同,而反转水平又由各信号光功率、抽运光功率及其沿光纤分布的情况决定(见文献[3]式(19))。在规定的工作条件下,以实验所测增益谱代入(1)并令 G_k 为一定值,便可算出均衡滤波器的滤波谱。这一过程可以描述为:以本征增益谱在所要求的波长范围内的最低增益值为轴翻转,得到均衡器的滤波谱。这样得到的滤波谱,在原增益高的波长处损耗大,原增益低处损耗小,所得到的平坦增益是原增益谱中的最低值。但是,对于在两段光纤之间插入均衡器的放大器,均衡器的插入将引起粒子数反转水平的改变。这时(1)中的第一项包括了均衡器的影响,已经不是放大器在原工作点下的本征增益谱,不能事先用实验方法直接测得。此外,均衡器的引入还同时影响(1)式中的第二项:不同的滤波函数造成不同的粒子数反转水平,因而得到不同的增益谱(第一项),然后由第二项又得到不同的谱补偿。这种影响和补偿是连环的,因此,上述简单的本征增益谱反转方法不能达到谱平坦的要求,只能用多次迭代逐步逼近的方法解决。如果仅以增益恒定为条件,即允许 G_k 取不同值,便可由(1)解得多个满足增益平坦的均衡滤波谱。其中必有一个最佳滤波谱,对应着可能得到的最高增益。

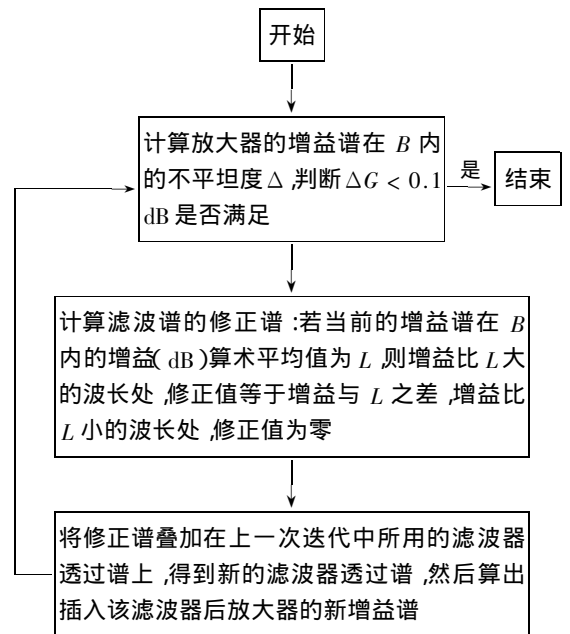
为了快速计算出这一最佳滤波谱,本文提出一种以平均值为参考轴的迭代算法。算法的关键是,在每一步迭代中,都取当前增益谱在所要求的平坦

波长范围内的算术平均值作为参考轴,在增益比平均值高的波长范围内将增益谱反转,反转谱作为该波长范围内滤波器的损耗谱,而在增益比平均值低的波长范围内,滤波器的损耗取为零。由于均匀展宽的机制,损耗大的波长处增益受到抑制,而其他波长的增益会自动升高,其结果是增益谱仍有起伏。如果起伏大于设计所要求的平坦度,则以当前的新的平均值为参考重复迭代直至起伏小于设计要求值为止。与其他调整方案相比,这种方法最大限度地减小了所需滤波器的损耗,从而使平坦后的放大器增益最大。

3 算法流程及实例

利用文献[4]提出的基于均匀展宽二能级模型的EDFA数值模拟方法,模拟计算时可以在放大器的任意位置处插入具有任意传输函数的光学元件。其特点是根据放大器的结构和工作点,计算出反转粒子数分布,再由此得出增益谱和噪声特性。

假定需要平坦的波长范围 $B = [\lambda_1, \lambda_2]$,要求不平坦度(定义为增益最大值与最小值之差) $\Delta G < 0.1$ dB。迭代开始前,滤波器的透过谱为相同值零。迭代的流程如下:



以一个实例说明该过程。图1显示了随着迭代的进行,增益谱逐渐变平坦以及滤波器形状逐渐变化的情况。计算所用的放大器为两段结构,段间隔离器。光纤长度分别为8 m和14 m,抽运功率

低,而 1540 nm 处的增益反而升高了 2.4 dB,体现了均匀展宽特性下不同波长间增益的互相补偿。

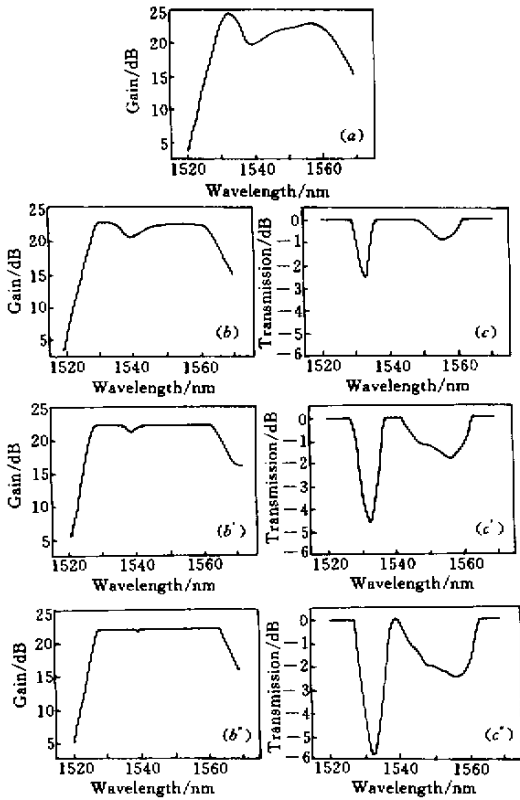


图 1 迭代过程中增益谱和滤波器透过谱的演变

(a)加滤波器前的增益谱,参考轴为 22.02 dB;(b)第一次迭代后的增益谱,参考轴为 22.15 dB;(c)对应的滤波谱;(b')中间某次的增益谱,参考轴为 22.28 dB;(c')对应的滤波谱;(b'')迭代结束时的增益谱;(c'')最终的滤波谱

Fig.1 Evolution of the gain spectrum and the filter spectrum during iteration

(a) original gain spectrum before adding filter, with reference level 22.02 dB;(b) gain spectrum after the first iteration step, with reference level 22.15 dB;(c) corresponding filter spectrum used;(b') gain spectrum after a certain iteration step, with reference level 22.28 dB;(c') corresponding filter spectrum used;(b'') final gain spectrum at the end of iteration;(c'') final filter spectrum

(980 nm)分别是 100 mW(正向)和 120 mW(反向),1553 nm 输入信号功率固定为 320 μW。由图可见,经过第一次迭代后的增益谱与原来的相比,增益较高的波长如 1530 nm 附近和 1550 nm 附近,增益显著降低,而增益较低的波长 1540 nm 附近增益明显变高。随着迭代的进行,增益谱平坦范围进一步扩大,1540 nm 附近的凹坑进一步变浅,而滤波器的损耗也变大。迭代结束时,增益谱在 1528 ~ 1563 nm 范围的不平坦度为 0.1 dB,平坦增益值为 22.26 dB。与原放大器相比,1530 nm 和 1550 nm 附近的增益降

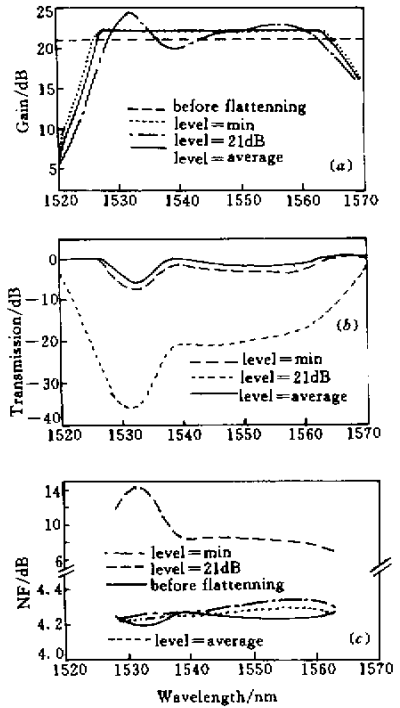


图 2 取不同参考轴(level)的对比结果

average:平均值法;min:最小值法;21 dB:固定轴的值;before flattening:加滤波器前的增益谱。(a)增益谱(b)滤波器透过谱(c)噪声系数谱

Fig.2 Comparison results under different reference-setting methods

“average”,“min”and“21 dB”indicates that the reference level in each step is set as the average gain level, the minimum gain level within the bandwidth set, and a fixed level 21 dB, respectively.

(a) gain spectrums;(b) filter spectrums;(c) noise figure spectrums

为了比较,下面列举两种用其他方法选取参考轴的迭代计算结果。第一种方法是取固定值 21 dB 为参考轴,第二种方法是每次取当前增益谱在要求的平坦波长范围内的最小值作参考轴。图 2(a),(b)(c)分别是不同方法下算得的增益谱、滤波谱和噪声系数谱。由图可见,取平均值方法得到的增益最大,滤波器的损耗最小,噪声系数也最小。对于取固定参考轴的方法,我们还取了 21 dB 外的其他值进行计算。结果表明,轴取得越高,其结果越接近取平均值方法的结果,但一旦轴取得略高于平均值算法下得到的增益值,迭代过程就不收敛,这意味着平均值算法得到的平坦增益已经达到原放大器条件

下可能达到的最大值。同时也注意到,以上提到的不同算法得到的滤波谱损耗差别尽管较大,但最后得到的增益谱差别并不大,这是因为两段之间加入的大小在一定范围内的损耗,都可以在后段中得到相当大程度的补偿。但在噪声问题上,平均值算法的优越性就比较明显。用 21 dB 固定值作参考轴算出噪声系数比平均值法约大 4 dB,而且不同波长间差别达 6 dB。

4 结 论

针对在两段级连 EDFA 级间插入平坦滤波器实现宽带(35 nm)增益平坦的滤波器透过谱的设计问题,利用掺铒光纤均匀展宽的特性和级连放大器自动增益补偿的原理,本文提出了一种以增益平均值为参考轴,以高出参考轴的部分反转谱为滤波谱修

正值的迭代算法。与其他可行的算法所得的结果相比,这种算法得到的平坦增益最大,滤波器损耗最小,噪声系数也最小。

参 考 文 献

- 1 Yanhong Xiao, Xiaoming Liu, Jingcui Cui *et al.*. Partly gain-clamped EDFAs with high gain and high power. *Fifth Asia-Pacific Conference on Communications and Fourth Optoelectronics and Communications Conference*, Beijing, Oct. 1999. 1364 ~ 1366
- 2 Paul F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola *et al.*. Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10):1343 ~ 1345
- 3 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271 ~ 283
- 4 Yu Qian, Cui Jingcui, Wang Sihai *et al.*. A new method for the numerical simulation of erbium doped fiber amplifiers. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(7):585 ~ 588