

拉曼 + EDFA 宽带混合光放大器的实现和设计优化

陈 健, 张 巍, 刘小明, 彭江得, 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 基于对增益和噪声特性的分析, 本文实现了长距离宽带传输系统中由分布拉曼放大器和掺铒光纤放大器组成的宽带混合放大单元, 并提出了混合放大器进行优化设计的方法, 特别指出适当调整拉曼放大器和掺铒光纤放大器的增益谱可以实现噪声谱的平坦。

关键词: 拉曼放大器; 混合放大; 设计

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1302-03

Realization and Optimal Design Optimizing of Broadband Raman + EDFA Hybrid Amplifiers

CHEN Jian, ZHANG Wei, LIU Xiao-ming, PENG Jiang-de, ZHOU Bing-kun

(Dept. of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the experimental and theoretical investigations on the gain and noise characteristics, a broadband hybrid amplifier composed of distributed Raman amplifier and EDFA is realized. A method for optimal design of the hybrid amplifier is proposed. It is pointed especially that adjusting the gain spectra of Raman amplifier and EDFA properly can realize flat noise figure spectrum.

Key words: Raman amplifier; Hybrid amplifier; design

1 引言

随着长距离宽带传输系统向着更高的速率和更多的信道不断发展, 传统的掺铒光纤放大器已经逐渐无法满足系统对信号信噪比的要求。与此同时, 拉曼光纤放大器受到越来越广泛的重视和研究^[1-3]。拉曼光纤放大器可以是一种分布式的放大器; 与分立的 EDFA 相比, 它具有结构简单, 噪声低, 增益谱宽等许多优点, 能够有效提高系统的性能, 因此成为目前长距离宽带光纤传输系统中的关键器件之一。

由于拉曼放大器的增益系数很低, 要获得大的增益往往需要较大功率的泵浦源, 同时, 作为一种分布放大系统, 增益较大会使传输光纤中的平均功率显著增大, 从而增加非线性带来的不利影响。再者, 为了得到平坦的宽带增益谱, 往往需要多个泵浦同时工作, 如果增益很大, 会使增益谱的平坦不易实现。

因此, 目前长距离传输系统常常采用拉曼放大器和 EDFA 组成一种混合放大器来对信号进行中继放大^[4-6]。这样既利用了拉曼放大器低噪声的特性, 也利用了 EDFA 增益高, 易控制的特性, 从而可以获得比较好的系统性能。

但是, 在目前应用拉曼放大器和 EDFA 混合放大的传输系统中, 拉曼放大器只是一种提高系统性能的方法, 它的设计与 EDFA 和系统的设计往往各自独立, 导致没有一个有效的

方法来对混合放大系统中的拉曼和 EDFA 的参数进行选择, 从而限制了混合放大系统的应用。

本文通过对混合放大器的增益和噪声特性的分析, 实现了宽频带内低噪声放大特性, 并据此对混合放大器的增益谱和噪声谱的设计进行了分析和优化。

2 基于增益和噪声特性分析的宽带混合放大器

在系统应用和实验研究中, 混合放大器的结构如图 1 所示。拉曼放大器采用反向泵浦的方式, 与 EDFA 级联形成两级放大。

对于这种由拉曼放大器和 EDFA 组成的混合放大器来说, 它的增益和噪声系数可以表示为:

$$G_{\text{hybrid}} = G_{\text{Raman}} \cdot G_{\text{EDFA}} \quad (1)$$

$$NF_{\text{hybrid}} = \frac{1}{G_{\text{hybrid}}} \left(1 + \frac{P_{\text{ase, Raman}} \cdot G_{\text{EDFA}} + P_{\text{ASE, EDFA}}}{h\nu B_0} \right) \quad (2)$$

其中 G_{Raman} 为拉曼放大器的开关增益, G_{EDFA} 为 EDFA 的增益, $P_{\text{ASE, Raman}}$ 为拉曼放大引入的 ASE 功率, 而 $P_{\text{ase, EDFA}}$ 是 EDFA 引入的 ASE 功率。

这里, 拉曼放大器和 EDFA 共同提供增益来补偿信号在光纤传输中的损耗, 为了获得平坦的宽带增益谱, 必须仔细设计拉曼放大器的增益谱和 EDFA 的增益谱, 使它们的增益谱

收稿日期: 2002-05-20; 修回日期: 2002-06-15

迭加后满足系统对增益谱平坦的要求. 其中多泵浦的拉曼放大器的增益谱的设计十分关键; 它需要对泵浦波长与功率同时进行选择. 图 2 给出了多泵浦拉曼放大器实验中不同泵浦波长和三个泵浦同时工作时的增益谱, 泵浦波长和功率分别为 1420nm(97.5mW), 1430nm(75mW), 1450nm(225mW).

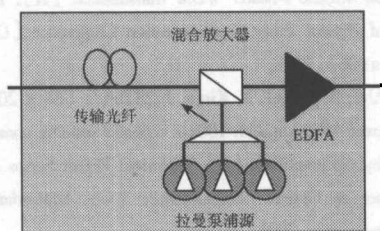


图 1 混合放大器结构

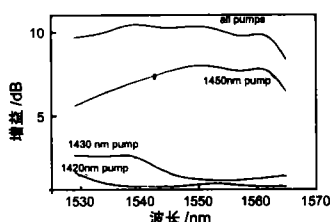


图 2 不同波长泵浦以及多泵浦同时工作时拉曼放大器的小信号增益谱

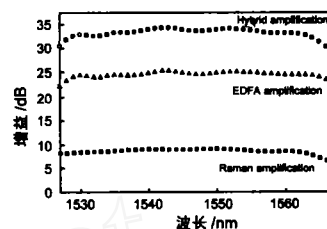


图 3 混合放大器的增益谱 (以及拉曼放大器和 EDFA 的增益谱)

另外, 分布放大拉曼放大器引入的 ASE 噪声与 EDFA 相比有很大程度的改善. 图 4 给出实验测得的拉曼放大器的有效噪声系数, 可以看到拉曼放大器的有效噪声系数一般小于零. 由于它位于混合放大器的第一级放大, 能够有效的改善放大器的噪声特性, 从而能够提高系统整体性能. 根据式 (2) 可

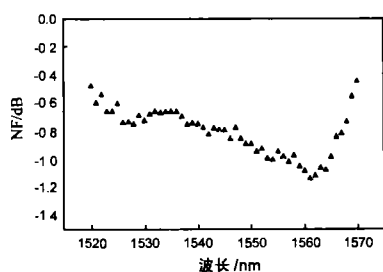


图 4 实验测得拉曼放大器的有效噪声系数

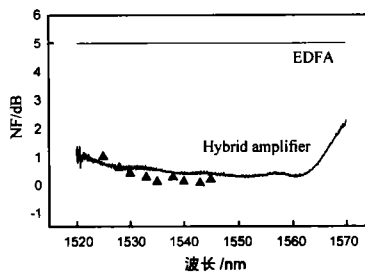


图 5 混合放大器的噪声系数, “▲”为实验测得的混合放大器噪声系数

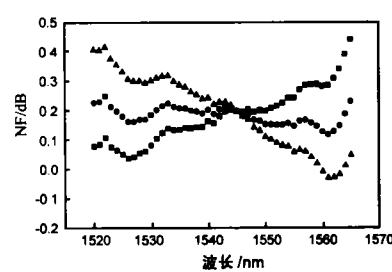


图 8 不同拉曼增益谱倾斜情况下的混合放大器噪声系数谱。
▲—拉曼增益谱倾斜度 0dB/nm;
●—拉曼增益谱倾斜度为 -0.04dB/nm;
■—拉曼增益谱倾斜度为 -0.08dB/nm。

3 混合放大器的设计与优化

对混合放大器的特性分析说明, 其设计比 EDFA 的设计要复杂的多. 除了要分别设计组成混合放大器的拉曼放大器和 EDFA 外, 还要合理的分配拉曼放大器和 EDFA 的增益值, 充分考虑拉曼放大器引入的非线性的影响, 使得混合放大器无论从经济上还是性能上达到最优。

由式 (3) 可知, 拉曼放大器开关增益越大, 混合放大器的噪声系数越低, 如图 6 所示. 为了讨论的方便, 假设 EDFA 的噪声系数为 5dB, 拉曼放大器的有效噪声系数为 -0.5dB. 可以看到, 随着拉曼放大器增益的增加, 混合放大器的噪声系数的减小越来越小, 从而获得的放大器的性能的改善也越来越小。

但是, 随着拉曼放大器增益的增加, 传输光纤中的平均信号功率也不断增加, 从而导致非线性效应随着增加. 相对平均信号功率随着拉曼放大器开关增益的变化如图 7 所示, 其中相对平均信号功率定义为加入和未加入拉曼放大器时光纤中

图 3 给出了实验测得的混合放大器的增益谱, 在 1530 ~ 1560nm 范围内增益为 33.5 ± 1 dB. 其中 EDFA 的增益为 23dB, 噪声系数为 5dB. 输入光纤的信号功率为 $300\mu\text{W}$, 输入 EDFA 的信号功率为 $250\mu\text{W}$, G.655 光纤的长度为 47 公里。

$$\text{以得到: } NF_{\text{hybrid}} = \frac{NF_{\text{EDFA}}}{G_{\text{Raman}}} + NF_{\text{Raman}} - \frac{1}{G_{\text{Raman}}} \quad (3)$$

由式 (3) 可以算出混合放大器的噪声系数谱, 如图 5 所示. 这里假设 EDFA 的噪声系数为 5dB. 图中还给出了噪声系数的实测值, 与计算结果相符。

平均信号功率的比值. 因此, 在设计混合放大器时必须综合考虑拉曼放大带来的噪声性能的改善和非线性效应的恶化, 从中找到一个最优的增益分配方案。

另外, 由于拉曼放大中不同泵浦之间的功率转移以及自发辐射因子与泵浦波长相关, 使拉曼放大器的噪声系数和信号波长有关. 在相同增益水平下, 低波长信号的噪声系数往往

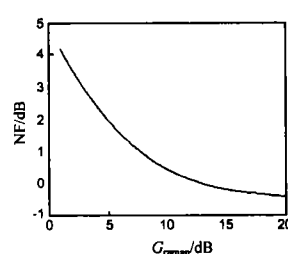


图 6 混合放大器噪声系数与拉曼增益的关系

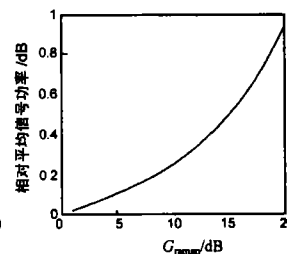


图 7 光纤中的相对平均信号功率与拉曼增益的关系

比高波长信号要大,从而造成噪声系数谱的倾斜.这样,就导致混合放大器的噪声系数谱也存在倾斜现象.由式(3)可知,当拉曼增益较小时,EDFA 的比较平坦的噪声系数谱可以在一定程度上补偿由于拉曼放大造成的噪声系数谱的倾斜,同时,如果通过选择拉曼泵浦来使拉曼放大器的增益谱倾斜,从而使短波长的信号增益较大而长波长的增益较小,也可以有效的缓解噪声系数谱的倾斜,如图 8 所示.

由图 8 可见,当拉曼增益谱不倾斜时,噪声系数谱总体上是长波长变好;而当拉曼增益谱的倾斜度为 -0.04dB/nm 时,噪声系数谱基本变平,当继续增加拉曼增益谱的倾斜度为 -0.08dB/nm 时,噪声系数谱总体上是短波长变好.因此,增加拉曼增益谱的倾斜度可以缓解混合放大器噪声系数谱的倾斜,而且还能够改变混合放大器噪声系数谱的倾斜方向.同时,为了保证混合放大器的增益谱的平坦,可以通过将 EDFA 的增益谱向与拉曼增益谱相反方向倾斜来实现.

4 小结

本文基于对混合放大器的增益和噪声特性的理论和实验分析,实现了 $1530\sim 1560\text{nm}$ 范围内增益为 $33.5\pm 1\text{dB}$,输出功率 17dBm 的宽带低噪声混合放大器,此外,考虑拉曼放大器与 EDFA 的增益分配和适当倾斜拉曼和 EDFA 的增益谱有助于实现该类放大器的设计优化.

参考文献:

- [1] Y Aoki. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems [J]. Journal of lightwave tech. 1988, 6(7): 1225 ~ 1239.
- [2] P B Hansen, L Eskildsen, S G Grubb, A J Stentz. Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplification [J]. IEEE photonics technology lett, 1997, 9(2): 262 ~ 264.
- [3] S Namiki, Y Emori. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and Gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes [J]. Journal of selected topics in quantum electronics, 2001, 7(1): 3 ~ 16.
- [4] I Morita, K Tanaka, N Edagawa. Benefit of Raman amplification in ultra-long-distance 40Gbit/s-based WDM transmission [A]. Technical Digest Series of Optical Fiber Communication Conference [C]. Anaheim, California: OSA, 2001.
- [5] K Ishida, J Abe, N Suzuki, K Kinjo. 1.28Tbit/s ($64\times 20\text{Gbit/s}$) Transmission over 4200 km with 100km repeater spacing consisting of Raman/EDF hybrid amplifiers [A]. Technical Digest Series of European Conference on Optical Communication [C]. Amsterdam: IEEE communications society, 2001.
- [6] N Shimojoh, T Tanaka, T Naiko, H Nakamoto. 1.22Tbit/s WDM transmission over 7221km with 38nm bandwidth expanded by distributed Raman amplifier and EDFA [A]. Technical Digest Series of Optical Fiber Communication Conference [C]. Anaheim, California: OSA, 2001.

作者简介:



陈 健 男, 1973 年 10 月生于河南省郑州市, 1997 年获得清华大学电子工程系学士学位, 现为清华大学电子工程系信息光电子研究所博士研究生, 主要研究领域: 光纤拉曼放大器的基本特性, 宽带光纤拉曼放大器及其在长距离大容量光传输系统中的应用, 光纤非线性对光传输系统的影响等.