

文章编号: 0253-2239(2004)04-517-4

双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计算法*

马永红 谢世钟

(清华大学电子工程系宽带光网络研究中心, 北京 100084)

摘要: 基于双向抽运拉曼放大器的功率耦合方程, 采用遗传算法和级链的全局收敛的 Broyden 方法, 提出一种优化设计不同形式双向抽运宽带光纤拉曼放大器的自动配置算法。该算法的特点是计算速度快、收敛性好、适应面广。通过对单光纤的分布式、具有不同增益要求的分立式以及不同周期的色散管理结构的分布式双向抽运拉曼放大器的设计表明: 在 10 THz 的增益带宽内, 放大器的增益平坦度均优于 ± 0.6 dB, 表明了该算法的可行性。此方法为采用双向抽运技术的拉曼放大器及其相应的全拉曼光纤传输系统的设计提供了一个公共平台。

关键词: 光纤拉曼放大器; 优化; 双向抽运; 色散管理光纤

中图分类号: TN929 文献标识码: A

Optimal Design Algorithm for Bi-Directionally Pumped Raman Amplifiers

Ma Yonghong Xie Shizhong

(Broadband Optical Network Research Center, Department of Electronic Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 17 February 2003)

Abstract: Based on the standard coupled equations describing bi-directionally pumped fiber Raman amplifiers (BDP-FRAs), a generalized automatic algorithm with the help of genetic algorithm and cascaded global convergent Broyden method is proposed for the design of broadband BDP-FRAs. The main advantages of this algorithm are higher efficiency, easier convergence and wider application. The numerical calculation illustrates that the gain flatness for 10 THz gain bandwidth is well within ± 0.6 dB for three kinds of FRAs; discrete amplifiers with different gain values, single-fiber distributed amplifiers and dispersion-managed-fibers distributed amplifiers with different dispersion-managed-periods. These results show the flexibility of our proposed design algorithm. This algorithm provides a common design platform for varied BDF-FRAs and corresponding all-Raman optic-fiber transmission systems.

Key words: fiber Raman amplifiers; optimization; bi-directionally pumping; dispersion-managed fibers

1 引 言

由于光纤拉曼放大器(Fiber Raman amplifier, FRA)具有大的增益带宽、灵活的增益谱区以及低的放大的自发辐射(Amplified spontaneous emission, ASE)噪声,近年来它在大容量、长距离光纤传输系统中获得越来越多的应用^[1]。在初期的拉

曼传输系统中,由反向抽运的光纤拉曼放大器和掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)组成的混合式放大结构得到广泛应用。近期的实验研究表明,在波分复用的光纤传输系统中,双向抽运的光纤拉曼放大器相对于混合式结构具有明显的优点^[2];而且借助双向抽运技术,可以克服在反向抽运方式下双瑞利散射对放大器增益的限制,从而可以实现极具应用前景的全拉曼传输系统。

拉曼放大系统的特性与光纤拉曼放大器的性能密切相关,其设计算法受到广泛关注^[3,4]。但据作

* 国家自然科学基金(90104003)资助课题。

E-mail: mayh2000@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2003-02-17

者了解,先期众多理论研究多局限于反向抽运和单传输光纤的情况,宽带(达 10 THz)多波长双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计算法还鲜见报道;同时实验实现的光纤拉曼放大器带宽相对较小,增益平坦度也不够理想^[5,6]。

前期我们讨论了包括色散管理形式的多波长反向抽运光纤拉曼放大器的优化设计问题^[7]。那里借助简单的数学变换,通过将复杂的双边值问题转化为初值问题的求解,使得该问题得以解决。但对双向抽运的光纤拉曼放大器,无相似的数学变换可资使用。本文在该工作的基础上,提出了一种宽带多波长双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计算法,并将其应用到不同形式的光纤拉曼放大器的优化设计中,同时提供了一些简单的设计准则。

2 理 论

双向抽运光纤拉曼放大器的典型结构如图 1 所示,它主要由增益介质(常规光纤)、抽运源、耦合器和隔离器组成。色散管理结构的光纤拉曼放大器每一放大段由周期性分布的正负色散光纤组成,且每一放大波段可包括多个色散管理周期。描述双向抽运光纤拉曼放大器的功率耦合方程见文献^[7]中公式(1)。

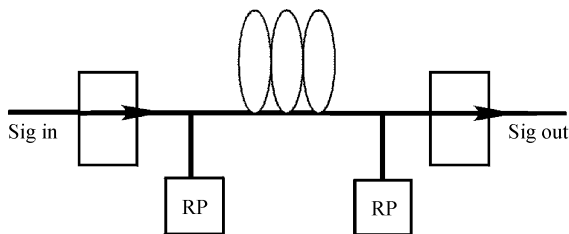


Fig. 1 Typical structure of bi-directionally pumped FRAs (RP: Raman pump)

对具有特定增益谱要求的宽带多波长双向抽运光纤拉曼放大器来说,通过直接求解方程(1)得到优化的抽运源参量(抽运频率和功率)是不现实的。借助遗传算法(Genetic algorithm, GA)^[8]和全局收敛的 Broyden^[9]方法,通过将抽运参量的优化和功率耦合方程的求解过程相分离,我们成功地解决了这一问题。整个设计流程由 4 步构成,如图 2 所示。

在图中,下标 p, s 表示抽运和信号波, f, b 代表前向和反向抽运方式,上标 P, N 代表正、负色散光纤, P, V, ν, I, G 和 NF 分别表示信号功率、猜测的抽运功率、频率、积分功率、增益因子及等效噪声系数,方程(2)~(3)见文献^[7]中相应公式。由于采用

双向抽运,公式(3), (3')中的积分功率应为前向和反向积分功率的和。

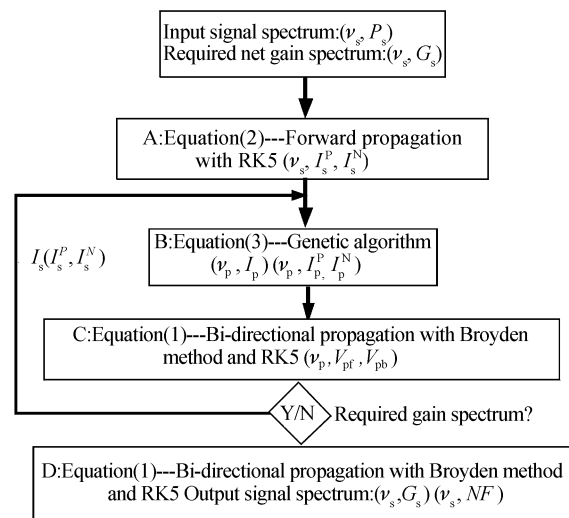


Fig. 2 Schematic diagram of optimal design algorithm

步骤 A 在忽略抽运作用的情况下,利用自适应步长的 5 阶龙格-库塔法(Fifth-order Runge-Kutta, RK5)法前向积分方程(2),得到步骤 B 的迭代初值 $I_s(I_s^P, I_s^N)$,即积分信号功率。步骤 B 利用遗传算法搜索积分抽运功率 $I_p(I_p^P, I_p^N)$ 和频率 ν_p 以满足方程(3)或(3'),此两步与文献^[7]相同。步骤 C 利用全局收敛的 Broyden 方法得到总的抽运功率 V_p 及其前向和反向抽运分量(V_{pf}, V_{pb}),这些数值必须满足积分功率的收敛要求。对反向抽运的光纤拉曼放大器,在文献^[7]中,我们利用公式(3)将双边值问题转化为初值问题,简化了求解过程。但对双向抽运的光纤拉曼放大器,双边值问题必须直接求解。为此通过构建两层级联的 Broyden 迭代,并合理设置迭代初值(总抽运功率 V_p 及反向传播抽运在放大器始端的功率值 V_{pb}^0),该问题得以解决。在两层结构中,内层迭代搜索 V_{pb}^0 来满足 V_p 的收敛要求,外层迭代搜索 V_p 来满足 $I_p(I_p^P, I_p^N)$ 的收敛要求。数值计算表明:对简单结构或低增益的光纤拉曼放大器,其迭代初值较易设定,但对复杂结构或高增益的光纤拉曼放大器,由于抽运间较强的非线性作用,使得简单的初值设定方法失效。然而通过将前者的计算结果设定为后者的迭代初值,可以迅速得到该问题的解。

由于步骤 B 的初值 $I_s(I_s^P, I_s^N)$ 是在忽略抽运作用的情况下得到的,问题的自恰解只有在多次重复步骤 B 和 C 的基础上才能获得。数值计算表明:通过有限的 3~4 次循环,足以满足要求。

步骤 D 利用上述结果,借助 Broyden 方法和

RK5 法直接数值求解方程(1),可以得到光纤拉曼放大器的开关增益谱和等效噪声谱。

3 数值模拟

我们的数值设计基于 6 个抽运源双向抽运的单光纤分布式、分立式以及色散管理结构的分布式光纤拉曼放大器,其中单光纤分布式光纤拉曼放大器的增益介质为 50 km 标准单模光纤(Standard single mode fiber, SMF),分立式光纤拉曼放大器的增益介质为 16 km 色散补偿光纤(Dispersion compensating fiber, DCF),色散管理结构的分布式光纤拉曼放大器的增益介质为 40 km 色散管理的光纤(其正、负色散光纤均 20 km,构成所谓的“三明治”结构)。拉曼增益系数参考标准的增益谱,100 个人纤功率为 -3 dBm/ch 的信道(信道间距 100 GHz)作为信号源,其它的光纤参量见文献[7]中表格。为表述方便,我们将抽运方式(0,0,0,0,0,0)记为 A,(0.25,0.25,0.5,0.5,0.75,0.75)记为

B,(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5)记为 C,(0.75,0.75,0.5,0.5,0.25,0.25)记为 D。括号中的参量依次为 6 个抽运源按高频到低频顺序前向抽运功率占总功率的比值。为符合系统应用要求,我们假定同一种光纤拉曼放大器在不同的结构参量下,具有相同的抽运频率。

单光纤的分布式光纤拉曼放大器由于具有低噪声的特点,常用来拓展光纤传输系统无中继传输的距离。借助于双向抽运,其拉曼和双瑞利散射噪声可进一步减小。图 3(a)为在抽运方式 C 下分布式光纤拉曼放大器抽运功率沿光纤的演化过程;图 3(b)显示在抽运方式 A、B、C、D 下光纤拉曼放大器的开关增益谱和等效噪声谱。由图可知:适当的前向抽运可用来改善在反向抽运下噪声谱的明显倾斜,高频抽运的前向分量越大,短波方向信号的噪声越低。优化设计结果表明:光纤拉曼放大器的增益平坦度在不同的抽运方式下均优于 ± 0.5 dB,要求的抽运功率在 0 dB 净增益情况下约为 1 W。

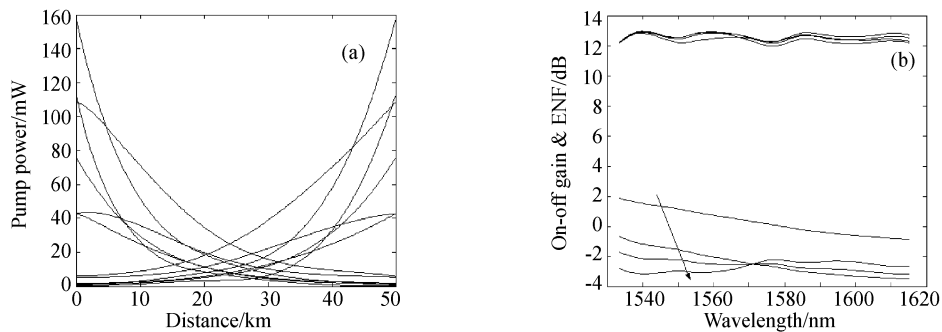


Fig. 3 (a) The evolution process for pump power with pumping scheme C; (b) On-off gain and noise figure spectrum of distributed FRAs with 4 kinds of pumping schemes (from A to D along the arrow)

由于拉曼放大具有近 30 THz 的增益带宽,分立式光纤拉曼放大器利用多波长共同抽运,可实现平坦的无缝宽带放大,从而达到简化放大器结构,减低系统成本的目的。图 4(a)为在抽运方式 C 下,净增

益 2 dB 的分立式光纤拉曼放大器抽运功率沿光纤的演化过程;图 4(b)显示不同净增益值下光纤拉曼放大器的开关增益谱和等效噪声谱。由图 4 可知,较大的净增益有助于噪声的降低(但如果计及双瑞利

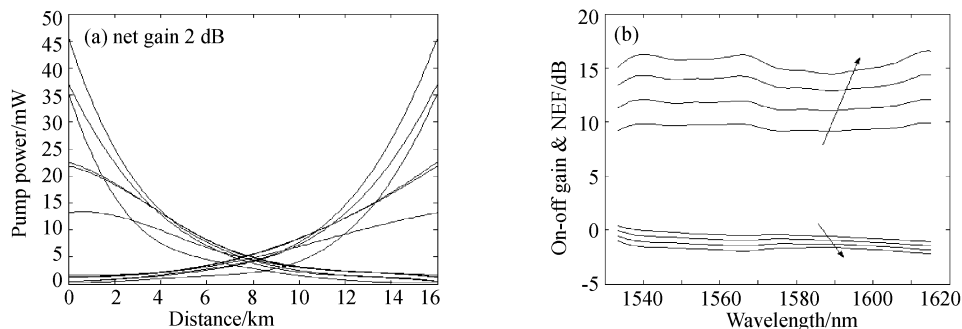


Fig. 4 (a) The evolution process of pump power along 16 km DCF of discrete FRA with net gain 2 dB; (b) On-off gain and noise figure spectrum of discrete FRAs with 4 kinds of net gain values (from 0 to 6 dB along the arrow)

散射噪声,光纤拉曼放大器的净增益则必须保持在一定的界限内)。优化设计结果表明:光纤拉曼放大器的增益平坦度在不同的净增益值下均优于 ± 0.6 dB,要求的抽运功率近似正比于开关增益值(该结论与反向抽运方式下一致),在无衰减情况下约为0.4 W。

色散管理结构的分布式光纤拉曼放大器利用精细的色散管理技术,一方面通过平衡自相位调制和色散的作用,可加大入纤功率,提高信噪比;另一方面,通过控制脉冲的动态特性,可抑制高速光纤传输系统中信道内的非线性效应,是长距离越洋传输系统中广泛采用的一项关键技术,最近也有试图将该

技术移植到陆用长跨距拉曼放大系统中的报道^[6]。图5(a)为具有1个色散管理周期的光纤拉曼放大器抽运功率沿色散管理光纤的演化过程。图5(b)显示具有1,2个色散管理周期的光纤拉曼放大器的开关增益谱和等效噪声谱。由图5可见,不同色散管理周期的光纤拉曼放大器,其增益谱和噪声谱变化不大。但由于其色散管理因子 S 不同,可以期待它们具有不同的传输特性^[10]。优化设计结果表明:光纤拉曼放大器增益平坦度在不同的色散管理周期下,均优于 ± 0.5 dB,要求的抽运功率在0 dB净增益情况下约为0.6 W。

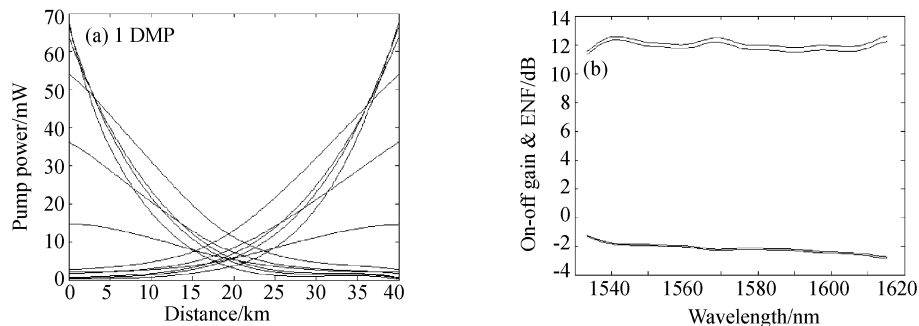


Fig. 5 (a) The evolution process of pump power along DM-fiber with 1 DMP; (b) On-off gain and noise figure spectrum of DM-FRAs with 1,2 DMP (DMP: dispersion-managed period)

结论 本文基于遗传算法和级链的全局收敛的Broyden方法,提出一种设计不同形式双向抽运宽带光纤拉曼放大器的优化设计算法。通过数值设计发现,在10 THz的增益带宽内,单光纤分布式、分立式及色散管理结构的分布式宽带拉曼放大器的增益平坦度均优于 ± 0.6 dB,且典型的运行时间大约为20 min,表明了该算法的普遍适用性和高效性。

由于采用前向抽运,可能带来抽运相对强度噪声转移,信道偏振相关增益以及信道间非线性交叉增益调制的增强,双向抽运光纤拉曼放大器的系统应用需要综合考虑其影响。

参 考 文 献

- 1 Evans A. Raman amplification in broadband WDM systems. *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference '01*, 2001, TuF4
- 2 Zhu Y, Fludger C R S, Lee W S *et al.*. Experimental comparison of all-Raman vs. Raman/EDFA hybrid amplification with 40 Gb/s-based ETDM/DWDM transmissions over 400 km TW-RS fibre. *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference '02*, 2002, ThX1
- 3 Jia Dongfan, Li Shichen, Song Lijun. Optimized design of

- fiber Raman amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):808~811 (in Chinese)
- 4 Tong Zhi, Wei Huai, Jian Shuisheng. Numerical simulation and optimization of broadband fiber Raman amplifiers using multi-wavelength pumps. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2):193~196 (in Chinese)
- 5 Qian Y, Dyrbol S, Anderson J S *et al.*. Bi-directionally pumped discrete Raman amplifier with optimized dispersion compensation for non-shifted transmission fibre. *28th European Conference on Optical Communication*, 2002, 4.1.6
- 6 Rasmussen C, Dey S, Liu F *et al.*. Transmission of 40×42.7 Gbit/s over 5200 km UltraWave fiber with terrestrial 100 km spans using turn-key ETDM transmitter and receiver. *28th European Conference on Optical Communication*, 2002, PD 4.4
- 7 Ma Yonghong, Xie Shizhong. Optimal design and analysis of broadband fiber Raman amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(1):42~47 (in Chinese)
- 8 Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + data Structures = Evolution Programs*. New York: Springer-Verlag, 1992
- 9 Press W H, Teukolsky S A *et al.*. *Numerical Recipes in C; The Art of Scientific Computing* (second edition). Beijing: Cambridge University Press and Electronic Industry Press, 1995. 329~333
- 10 Martensson J, Berntson A. Dispersion-managed solitons for 160 Gbit/s transmission. *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference '01*, 2001, MF7