

同向抽运光纤拉曼放大器的阈值特性

龙青云¹ 吴庭万² 胡素梅³ 张秋晶¹ 吕晓兰¹

¹广东石油化工学院计算机与电子信息学院, 广东 茂名 525000

²华南理工大学理学院, 广东 广州 510640

³广东石油化工学院理学院, 广东 茂名 525000

摘要 为全面分析同向抽运光纤拉曼放大器的阈值特性,基于耦合微分方程,采用龙格库塔算法,数值模拟同向抽运光纤拉曼放大器中信号光功率沿光纤的演变过程,在此基础上根据实际情况推导出同向抽运光纤拉曼放大器的阈值公式。然后,数值计算各个参数对同向抽运光纤拉曼放大器阈值特性的影响,结果表明,初始信号光功率、光纤有效长度、拉曼增益系数、抽运光和信号光频率比值增加,阈值减小;光纤有效面积越大,阈值越大。

关键词 光通信; 光纤拉曼放大器; 数值模拟; 阈值; 同向抽运; 受激拉曼散射

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.030603

Threshold Characteristics of Forward-Pumped Fiber Raman Amplifier

Long Qingyun¹ Wu Tingwan² Hu Sumei³ Zhang Qiuqing¹ Lü Xiaolan¹

¹College of Computer and Electronic Information, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China

²School of Sciences, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

³School of Sciences, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China

Abstract In order to analyze the threshold characteristics of forward-pumped fiber Raman amplifier (FRA), signal power distribution along a fiber for forward-pumped FRA is provided with Runge-Kutta method based on the coupling equations. Then, the theoretical expression of forward-pumped FRA's threshold is obtained with considering the practical factors, and the effects of these parameters on threshold of FRA are investigated detailedly. It is found that: the threshold will decrease when the initial signal power, the effective fiber length, Raman gain coefficient or the pump and signal frequency ratio increase, and the threshold will increase when the fiber efficient area increases.

Key words optical communications; fiber Raman amplifier; numerical simulation; threshold; forward pumping; stimulated Raman scattering

OCIS codes 060.2320; 060.2330; 060.4370; 060.4510; 290.5910

1 引言

随着全球信息化脚步的不断加快,各种通信业务成倍增长,要求现有的光纤通信网继续增加通信容量,掺铒光纤放大器(EDFA)仅 40 nm 的放大带宽显然不能满足要求,这就对光纤通信中的放大器提出了新的要求。光纤拉曼放大器(FRA)应运而生,成为光纤通信系统中的研究热点之一^[1-8]。阈值是 FRA 的重要特性,但是这方面的研究还较少^[9-10],尤其是少有基于光纤中信号光功率演变情况来详细探究阈值特性的报道。本文先仿真出同向抽运 FRA 中信号光功率沿光纤的演变过程,在此基础上根据实际情况推导出新的阈值公式。然后,详细分析各个参数对同向抽运 FRA 阈值特性的影响,进行总结和讨论,并与前期研究结果进行了对比。

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-27; 网络出版日期: 2014-03-01

基金项目: 广东省自然科学基金(s2013010012844)、2013年度茂名市工农业科技计划(201318)

作者简介: 龙青云(1982—),女,硕士,讲师,主要从事光纤通信器件方面的研究。E-mail: lian149605@163.com

2 理论基础

同向抽运 FRA 中, 信号光和抽运光的耦合微分方程为^[11]

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_s P_s(z), \quad (1)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\frac{\nu_p g_R}{\nu_s A_{\text{eff}}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_p P_p(z), \quad (2)$$

式中各参数的物理意义同前期研究^[11], z 表示光纤长度, $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$ 分别表示光纤长度 z 处的信号光功率和抽运光功率, A_{eff} 表示光纤有效面积, g_R 表示光纤的拉曼增益系数, ν_s 、 ν_p 分别表示信号光频率和抽运光频率, α_s 、 α_p 分别表示信号光所在波长和抽运光所在波长的光纤损耗系数。图 1 为联合(1)、(2)式, 采用龙格库塔算法得到的信号光功率沿光纤的演变图。可以看出, 抽运光转移给信号光的能量从一开始就较多, 信号光的放大从光纤输入端就开始了, 所以应该考虑这种信号光功率沿光纤演变的实际情况, 不应略去(2)式右边第一项[其物理意义是表示抽运光转移给信号光的能量, 之前求解(1)、(2)式时常略去, 但是和目前波分复用系统使用较大的信号光功率不符合, 不符合的定量分析见前期研究^[10], 其中给出了和实验及实际情况不符合的计算结果]。进而由上述耦合微分方程求得 $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$ 的解析结果:

$$P_s(z) = \frac{[P_s(0) + P_p(0)\nu_s/\nu_p]E \exp(-\alpha z)}{1 + E}, \quad (3)$$

$$P_p(z) = \frac{[P_s(0)\nu_p/\nu_s + P_p(0)]\exp(-\alpha z)}{1 + E}, \quad (4)$$

式中 $E = \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} \exp\left\{\frac{g_R}{A_{\text{eff}}}[P_s(0)\nu_p/\nu_s + P_p(0)]L_{\text{eff}}\right\}$, 为无量纲的物理量; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$, 为光纤有效长度。

根据文献[9]关于阈值的定义, $P_s(L) = P_p(L)$ 时满足阈值条件, 得到阈值满足的关系式为

$$P_{\text{cr}} / \exp\left[\frac{g_R L_{\text{eff}} P_{\text{cr}}}{A_{\text{eff}}}\right] = P_s(0) \exp\left[\frac{\nu_p g_R L_{\text{eff}} P_s(0)}{\nu_s A_{\text{eff}}}\right]. \quad (5)$$

文献[12]给出的阈值公式是

$$P_{\text{cr}} = 16A_{\text{eff}}/(g_R L_{\text{eff}}). \quad (6)$$

前期研究^[10]已经说明当信号光功率非常小时, (5)式过渡到(6)式, (5)式才是同向抽运 FRA 阈值的真实解。由(5)式可知阈值会受到许多参数的影响, 如 g_R 、 L_{eff} 、 A_{eff} 、 $P_s(0)$ 、 ν_s 及 ν_p 等。下面利用数值计算的方法详细分析它们对阈值的影响。

3 数值结果与讨论

数值计算的参数取值同文献[11]。各参数对阈值的影响分别如下。

3.1 初始信号光功率 $P_s(0)$ 对阈值的影响

如图 2 所示, 阈值和 $P_s(0)$ 呈反向关系, 即 $P_s(0)$ 增加时阈值减小。而且, 随着 $P_s(0)$ 的增加, 阈值减小的速

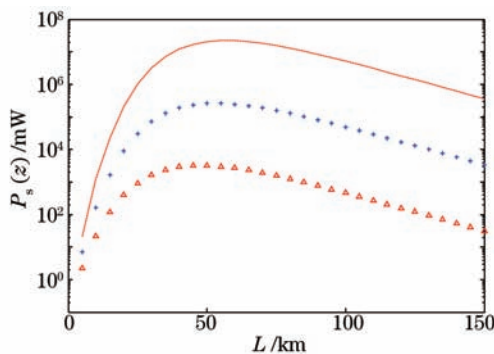


图 1 同向抽运 FRA 的 $P_s(z)$ 与 L 的关系

Fig.1 Relation between $P_s(z)$ and L for forward-pumped FRA

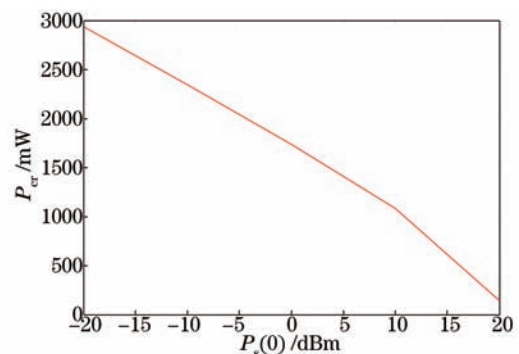


图 2 P_{cr} 与 $P_s(0)$ 的关系

Fig.2 Relation between P_{cr} and $P_s(0)$

度加快。这说明输入端有较大的初始信号光功率时,越容易发生受激拉曼散射(SRS)效应,FRA越容易放大信号。这是目前波分复用系统中一方面要减小拉曼串扰,另一方面能够利用和必须使用FRA放大信号的物理原因。

3.2 光纤有效长度 L_{eff} 对阈值的影响

首先,由图3可以看出,阈值随着 L_{eff} 增加而降低,但降低的速度越来越缓慢。究其原因是随着 L_{eff} 增加,光纤里发生的SRS效应更加充分。由 L_{eff} 定义公式可知,其最大值为 $1/\alpha$,对于阈值取得最小值。这是研究FRA抽运效率的路径之一,并且对于长距离通信中固定的两地之间是否使用FRA也起到定性判决的作用。其次,由(5)式可以看出,阈值只与 L_{eff} 有关,与光纤长度、衰减系数无直接关系。此结论为设计分立式FRA提供了理论参考依据,即分立式FRA的光纤长度不能无限延长,而是必须在 L_{eff} 的范围内。

3.3 光纤有效面积 A_{eff} 对阈值的影响

考虑到不同类型和不同厂家的光纤参数, A_{eff} 的取值范围为 $10 \sim 100 \mu\text{m}^2$ 。由图4可知:阈值随 A_{eff} 增大而增大,两者为正向关系。从理论上分析,假设 s 为单模光纤的模场半径,则 $A_{\text{eff}} = \pi s^2$,所以抽运光与信号光发生SRS作用时直接与单位面积的入纤功率强度有关,即与入纤功率密度有关。当 A_{eff} 增加时,入纤功率密度下降,为了保证发生SRS效应,必然要求提高输入端的抽运光功率,即提高发生SRS的阈值。

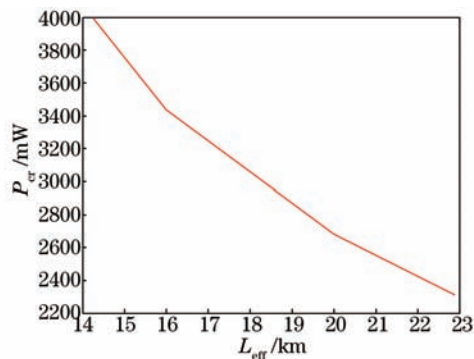


图3 P_{cr} 与 L_{eff} 的关系

Fig.3 Relation of P_{cr} and L_{eff}

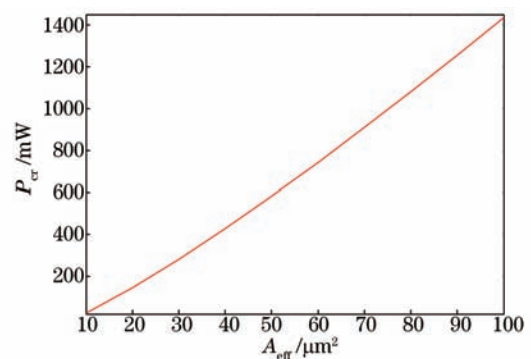


图4 P_{cr} 与 A_{eff} 的关系

Fig.4 Relation of P_{cr} and A_{eff}

3.4 拉曼增益系数 g_{R} 对阈值的影响

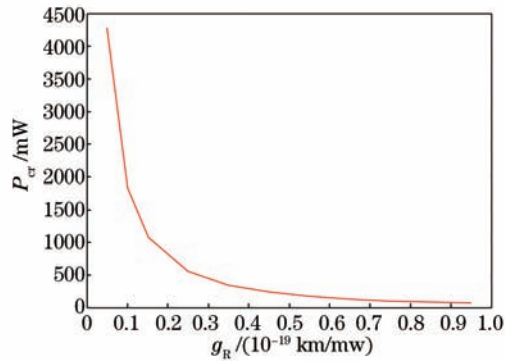
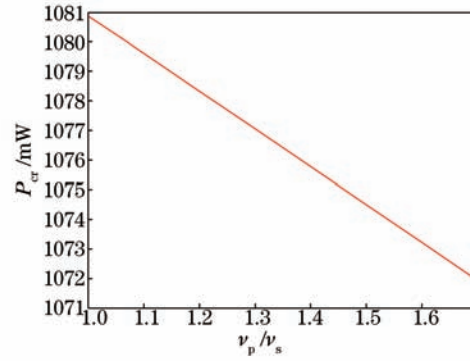
FRA最显著的特征是增益系数 g_{R} 延伸覆盖一个很大的频率范围(可达40 GHz),即增益谱很宽,并且其值与波长呈反比。考虑到此特点以及不同类型光纤的 g_{R} 区别较大, g_{R} 取值为 $(0.5 \sim 9.5) \times 10^{-20} \text{ km/mW}$ 。由图5可以看出, g_{R} 对阈值的影响非常明显, g_{R} 增加,阈值下降,两者呈反向关系。当 g_{R} 较大时,SRS只需要很小的外界激励就能发生,FRA几乎不需要考虑阈值的问题。比如,利用高非线性光纤(HNLF)来制作分立式FRA就是利用HNLF具有较大 g_{R} 的特点。当 g_{R} 较小时,阈值将达到数瓦甚至数十瓦,SRS过程将受限于阈值,FRA的功率转换效率就低,导致器件成本较高。目前激光器的技术已经达到此水平,并且FRA较低的效率同时带来低噪声和高饱和增益的优势,所以FRA越来越受到市场的青睐。

3.5 信号光频率 ν_s 、抽运光频率 ν_p 对阈值的影响

由(5)式可以看出,阈值与频率比 ν_p/ν_s 有关。考虑到FRA中抽运光的波长一般比信号光小100 nm左右,而且FRA适用于全波段,所以仿真时频率比取值范围界定在区间1~2。由仿真结果图6可得,阈值随着 ν_p/ν_s 增加而减小,减小的速度很慢,阈值和 ν_p/ν_s 呈反向关系。这对于FRA的实验和研发工作有指导意义,比如为了降低开发FRA的成本,在L波段(1565~1625nm)工作的FRA完全可以采用成熟的1480 nm激光二极管(LD)或者更短波长的LD作为抽运源。

4 结 论

基于同向抽运FRA中的耦合微分方程,采用龙格库塔算法,仿真出信号光功率沿光纤的演变过程,在此基础上推导出新的阈值公式。然后,详细探究各个参数对同向抽运FRA阈值特性的影响,结果表明:1)初

图5 P_{cr} 与 g_R 的关系Fig.5 Relation between P_{cr} and g_R 图6 P_{cr} 与 ν_p/ν_s 的关系图Fig.6 Relation between P_{cr} and ν_p/ν_s

始信号光功率、光纤有效长度、拉曼增益系数、抽运光和信号光频率比值增加, 阈值减小; 2) 光纤有效面积越大, 阈值越大。

上述结论与前期研究和文献的结果比较, 有新的进展, 可为进一步研究 FRA 和相关实验提供有益的参考。

参考文献

- Xu Jia, Wang Lei, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width 1653 nm Raman fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602001.
徐 佳, 汪 磊, 刘 江, 等. 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602001.
- Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping, *et al.*. Simulation on single-frequency Raman fiber amplifiers utilizing multi-stage amplification scheme[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0606007.
冷进勇, 吴武明, 陈胜平, 等. 采用多级放大结构的单频拉曼光纤放大器的数值模拟[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0606007.
- Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping, *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency raman fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2334-2339.
冷进勇, 吴武明, 陈胜平, 等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2334-2339.
- Zhou Weijun, Xu Ming, Wang Rongbo. The design on gain flatness of distributed broadband fiber Raman amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030602.
周维军, 绪 明, 王荣波. 分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030602.
- Xu Jiangming, Leng Jinyong, Hou Jing, *et al.*. Cascaded all-fiber 1020 nm light source based on fiber raman amplification[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806001.
许将明, 冷进勇, 侯 静, 等. 基于光纤拉曼放大的级联式全光纤 1020 nm 光源[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806001.
- Long Qingyun, Deng Huaqiu, Cui Delong. Effect of pump power deployment on bi-directional pumping fibre Raman amplifier[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 216-218.
龙青云, 邓华秋, 崔得龙. 抽运功率配置对双向拉曼放大器性能的影响[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 216-218.
- Long Qingyun, Deng Huaqiu. Numeric simulation of fibre Raman amplifier's principle[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(4): 486-489.
龙青云, 邓华秋. 光纤拉曼放大器原理的数值模拟分析[J]. 半导体光电, 2012, 33(4): 486-489.
- Long Qingyun. Numeric simulation of gain characteristics of forward pumped fibre Raman amplifier[J]. J Guangdong University of Petrochemical Technology, 2012, 22(4): 46-48.
龙青云. 同向抽运光纤拉曼放大器增益特性的数值仿真[J]. 广东石油化工学院学报, 2012, 22(4): 46-48.
- Long Qingyun, Wu Tingwan. Analysis of threshold characteristics of fibre Raman amplifier[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 67-70.
龙青云, 吴庭万. 光纤拉曼放大器的阈值探析[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 67-70.
- Long Qingyun, Wu Tingwan, Deng Huaqiu. The analysis of critical condition of fiber raman amplifier[J]. J South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(1): 35-37.
龙青云, 吴庭万, 邓华秋. 光纤拉曼放大器中拉曼阈值的理论研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 35-37.
- Long Qingyun. Design of fibre Raman amplifier in ultra long haul system[J]. J Maoming University, 2007, 17(6): 49-51.
龙青云. 超长距离系统中光纤拉曼放大器的设计[J]. 茂名学院学报, 2007, 17(6): 49-51.
- Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.*. Nonlinear Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 440-442.
石顺祥, 陈国夫, 赵 卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 440-442.