

## 光纤拉曼放大器的最大拉曼增益特性

龙青云<sup>1,2</sup>, 胡素梅<sup>3</sup>, 朱伟玲<sup>3</sup>

- (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. 广东石油化工学院 广东省石化装备故障诊断重点实验室, 广东 茂名 525000;
3. 广东石油化工学院 理学院, 广东 茂名 525000)

**摘要:** 为了分析同向抽运与反向抽运光纤拉曼放大器的最大拉曼增益, 基于耦合微分方程, 采用理论推导的方法, 根据不同抽运结构下信号光放大的不同实际情况定义并推导出同向抽运光纤拉曼放大器和反向抽运光纤拉曼放大器的最大拉曼增益公式。然后, 详细分析了各个参数对两种抽运方式下光纤拉曼放大器的最大拉曼增益的影响。对两种抽运方式下相同参数引起的最大拉曼增益进行了比较。结果表明, 同样的参数对同向抽运与反向抽运光纤拉曼放大器最大拉曼增益的影响有相同的地方, 也有不同的地方。最后, 将最大拉曼增益和常用的开关增益进行了比较。对光纤拉曼放大器的实验、成本估计和器件效率等研究有重要参考意义。

**关键词:** 光纤通信; 光纤拉曼放大器; 理论推导; 最大拉曼增益; 同向抽运; 反向抽运  
**中图分类号:** TN929.11; O437.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0122006

## Maximum Raman gain characteristics of fibre Raman amplifier

Long Qingyun<sup>1,2</sup>, Hu Sumei<sup>3</sup>, Zhu Weiling<sup>3</sup>

- (1. College of Computer and Electronic Information, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Petrochemical Equipment Fault Diagnosis, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;
3. College of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** In order to analyze the maximum Raman gain of forward-pumped and backward-pumped fibre Raman amplifier (FRA), by theoretical derivation method for solving the differential coupling equations, the formulas for the maximum Raman gain of forward-pumped and backward-pumped FRA were defined and obtained based on different signal amplification process with different pumping structure. Using these new formulas, the effects of input signal power, input pump power, Raman gain coefficient per area, fibre attenuation and the pump to signal frequency ratio on the maximum Raman gain of forward-pumped and backward-pumped FRA were investigated in detail in the condition that the parameters were all of their typical values. Some results are consistent with results of involved references. Besides, maximum Raman gains of two pumping ways under the same parameter were compared. Finally, maximum Raman

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(11504059); 茂名市科技计划(201530); 广东石油化工学院模式识别与信息处理学科开放基金(2015-08-07); 广东省石化装备故障诊断重点实验室开放课题(GDUPTKLAB201615)

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

gain and on-off gain which was frequently-used were compared. These results are creative and helpful to the experiment study of FRA.

**Key words:** fibre optical communication; fibre Raman amplifier; theoretical derivation; maximum Raman gain; forward-pumped; backward-pumped

## 0 引言

尽管实现了 C 波段和 L 波段掺铒光纤放大器和基于色散管理孤子的非常高的谱效率两项技术,大容量波分复用系统的容量仍然在 market 需求的推动下以惊人的速度不断递增。为了满足这种需求,本质上属于分布式光纤放大器的光纤拉曼放大器(FRA, Fibre Raman Amplifier)受到青睐<sup>[1-10]</sup>。

FRA 的原理基于光纤里的受激拉曼散射过程对弱信号光的放大,是唯一一种光纤基全波段放大器。因为具有宽带宽、低噪声、在任意光纤上实现任意波长信号的放大等优点,FRA 被公认为是大容量光纤通信系统中不可或缺的关键器件之一<sup>[1-10]</sup>。近年来,FRA 得到大量的研究,特别是增益特性,但是这些研究无一例外是针对器件的开关增益的,对于 FRA 的最大拉曼增益特性的文献还较少<sup>[6]</sup>。前人只是近似地推导了同向抽运 FRA 的最大拉曼增益公式,还没有对 FRA 最大拉曼增益展开较全面的研究<sup>[6]</sup>。随着 FRA 研究的不断深入和应用范围的不断扩大,其最大拉曼增益的研究无疑对实验研究和工程设计都非常有帮助<sup>[1-6]</sup>。该研究基于不同的前提条件定义并推导出同向抽运 FRA 和反向抽运 FRA 的最大拉曼增益公式,详细探究各个参数对同向抽运 FRA 和反向抽运 FRA 的最大拉曼增益的影响,对两种抽运方式下相同参数对最大拉曼增益的影响进行对比和讨论,全面地研究了 FRA 的最大拉曼增益问题。最后将最大拉曼增益和常用的开关增益进行比较,得到一些有益的结论。

## 1 最大拉曼增益公式及其数值计算

同向抽运 FRA 和反向抽运 FRA 中,假设信号光和抽运光沿 z 轴的正方向传播,在连续和准连续波情况下,信号光和抽运光的耦合方程为<sup>[7]</sup>:

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

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

其中公式(2)左边取正号时代表同向抽运,取负号时代表反向抽运。 $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$ 分别是信号光和抽运光沿光纤分布的光功率,已知初始信号光功率  $P_s(0)$ 和初始抽运光功率  $P_p(0)$ ; $\nu_s$ 、 $\nu_p$ 分别是信号光和抽运光的频率; $g_R$ 为光纤的拉曼增益系数; $A_{\text{eff}}$ 为光纤有效面积。 $\alpha_s$ 和  $\alpha_p$ 为信号光和抽运光波长处的光纤损耗系数。由于单模光纤损耗系数已经很低,特别是在 1 550 nm 波段,可以认为  $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$ <sup>[7]</sup>。下面分别讨论同向抽运 FRA 和反向抽运 FRA 的最大拉曼增益。其中的参数取值同参考文献[10]。

### 1.1 同向抽运光纤拉曼放大器的最大拉曼增益

联立方程(1)、(2)进行求解,得到信号光功率为:

$$P_s(z) = \frac{A_0 E \exp(-\alpha z)}{1 + E} \quad (3)$$

式中: $A_0 = P_s(0) + P_p(0) \nu_s / \nu_p$ ,  $A_1 = A_0 \nu_p / \nu_s$ ,  $E = \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)}$

$\exp\left(\frac{g_R}{A_{\text{eff}}} A_1 L_{\text{eff}}\right)$ ,  $L_{\text{eff}} = (1 - \exp(-\alpha z)) / \alpha$ ,  $L_{\text{eff}}$ 为光纤的有效作用长度。由参考文献[8]可知,同向抽运 FRA 的信号光从一开始就得到放大,到达一定值后渐渐减小,增益达到饱和状态。如果用  $z_{\text{max}}$ 表示信号光一直得到放大的最大光纤长度,那么达到  $z_{\text{max}}$ 时,同向抽运 FRA 取得最大拉曼增益值。 $z_{\text{max}}$ 的解析式由公式(3)对 z 进行微分求得,即:

$$\frac{g_R \cdot A_1}{A_{\text{eff}} \cdot \alpha} \cdot \exp(-\alpha \cdot z_{\text{max}}) = 1 + E_{\text{max}} \quad (4)$$

$$E_{\text{max}} = \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} \exp\left(\frac{g_R}{A_{\text{eff}}} \cdot A_1 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot z_{\text{max}})) / \alpha\right) \quad (5)$$

为了强调从物理机制上 FRA 原理受激拉曼散射能提供的最大拉曼增益,将最大拉曼增益表示为:

$$G = 10 \lg \frac{P_s(z_{\text{max}})}{P_s(0)} \quad (6)$$

所以同向抽运 FRA 的最大拉曼增益可由公式(4)、(5)和(6)推导出来,其结果简化后为:

$$G_{\max} = 10 \lg \frac{\left( k_2 \frac{P_s(0)}{P_p(0)} + 1 \right) e^{-\alpha z_{\max}}}{k_2 \frac{P_s(0)}{P_p(0)} + \exp \left[ (k_1 k_2 P_s(0) + k_1 P_p(0)) \frac{e^{-\alpha z_{\max}} - 1}{\alpha} \right]} \quad (7)$$

式中:  $k_1 = g_R/A_{\text{eff}}$ ,  $k_2 = v_p/v_s$ 。可以看出, 同向抽运 FRA 的最大拉曼增益受到五个因素的影响, 即  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\alpha$ 、 $P_p(0)$ 、 $P_s(0)$ 。这里推导出的最大拉曼增益公式(7)比参考文献[6]给出的公式更加全面, 参考文献[6]推导出的最大拉曼增益公式只与  $g_R$ 、 $\alpha$ 、 $P_p(0)$  三个参量有关。以下是由数值计算得到的各个参数对同向抽运 FRA 的最大拉曼增益的影响图示, 同时以细线条的形式在图中标注了各个参数对  $z_{\max}$  的影响。

### 1.1.1 $P_s(0)$ 对同向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 1 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $P_s(0)$  增加而减小, 对应  $z_{\max}$  也随  $P_s(0)$  增加而减小。 $G_{\max}$  和  $P_s(0)$  的关系与  $P_s(0)$  和开关增益的关系类似<sup>[10]</sup>。这也充分说明通信线路中较大的信号光功率不利于获得  $G_{\max}$  和  $z_{\max}$ , 反而会引起拉曼串扰, 给系统带来噪声。

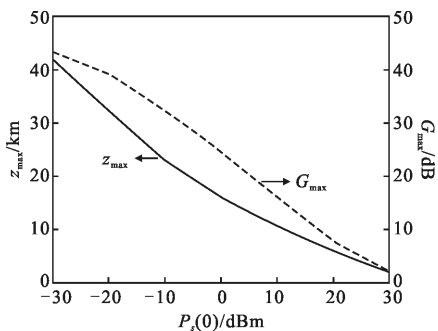


图 1 同向抽运 FRA 中  $z_{\max}$ 、 $G_{\max}$  与  $P_s(0)$  的关系图

Fig.1 Relation of  $z_{\max}$ ,  $G_{\max}$  and  $P_s(0)$  for forward-pumped FRA

### 1.1.2 $P_p(0)$ 对同向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 2 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着

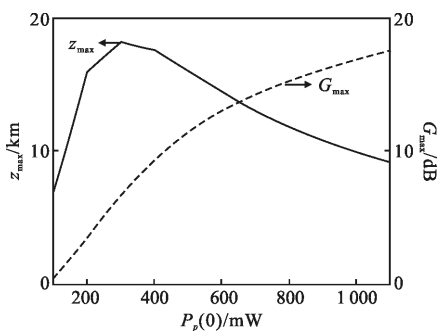


图 2 同向抽运 FRA 中  $z_{\max}$ 、 $G_{\max}$  与  $P_p(0)$  的关系图

Fig.2 Relation of  $z_{\max}$ ,  $G_{\max}$  and  $P_p(0)$  for forward-pumped FRA

$P_p(0)$  增加而增加, 但是增加的幅度越来越小, 可以预计  $P_p(0)$  增加到一定值时,  $G_{\max}$  达到其峰值。 $z_{\max}$  的变化趋势是随  $P_p(0)$  先增加后减小。此结果说明  $P_p(0)$  越大  $G_{\max}$  越大, 但是如果得到较好的器件功率转换效率, 以降低 FRA 的抽运功率, 则需要根据给定参数来确定对应的  $P_p(0)$ , 使得 FRA 尽量工作在  $z_{\max}$  附近。

### 1.1.3 $\alpha$ 对同向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 3 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $\alpha$  增加而接近匀速地减小, 对应  $z_{\max}$  也随  $\alpha$  增加而减小。因为光纤损耗消耗抽运光能量, 这样的结果和实际是相符的。值得一提的是: 当  $\alpha$  从 0.2 dB/km 增加至 0.48 dB/km 时,  $G_{\max}$  总的减小值约为 4 dB, 说明现在敷设的光纤的低损耗系数对  $G_{\max}$  的影响较弱。

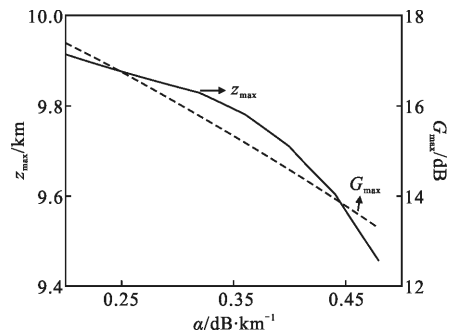


图 3 同向抽运 FRA 中  $z_{\max}$ 、 $G_{\max}$  与  $\alpha$  的关系图

Fig.3 Relation of  $z_{\max}$ ,  $G_{\max}$  and  $\alpha$  for forward-pumped FRA

### 1.1.4 $k_1$ 对同向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 4 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $k_1$  增加而增加, 增加的趋势开始是迅猛的, 后来增加的幅度越来越小,  $G_{\max}$  趋近于饱和。对应  $z_{\max}$  随  $k_1$  增加而迅速增加到一定峰值, 然后从峰值开始慢慢减小。总之,  $k_1$  的变化引起  $z_{\max}$  和  $G_{\max}$  较大的变化, 因为

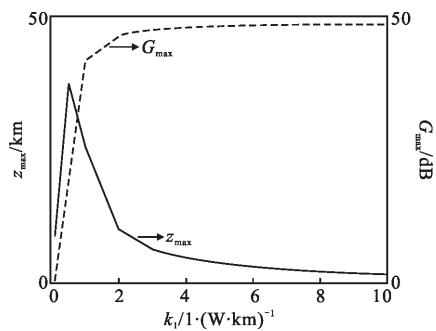


图 4 同向抽运 FRA 中  $z_{\max}$ 、 $G_{\max}$  与  $k_1$  的关系图

Fig.4 Relation of  $z_{\max}$ ,  $G_{\max}$  and  $k_1$  for forward-pumped FRA

$k_1$  可看作单位面积的拉曼增益系数, 直接与 FRA 放大信号的能力有关。当  $k_1$  取值低于一定值时, 数值模拟的  $z_{\max}$  取负值, 这和 FRA 处在拉曼阈值以下时不能正常工作的结论相符<sup>[9]</sup>; 当  $k_1$  取值较高时,  $G_{\max}$  渐渐饱和, 此时 FRA 容易放大信号, 甚至增益饱和后会引起下一级受激拉曼散射而成为 FRA 的噪声。

### 1.1.5 $k_2$ 对同向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 5 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $k_2$  增加而减小, 对应  $z_{\max}$  也随  $k_2$  增加而减小。说明为了获得  $G_{\max}$ , 抽运光和信号光的频率不宜相差太大。相比于其他参数,  $k_2$  对  $G_{\max}$  的影响不是特别明显。

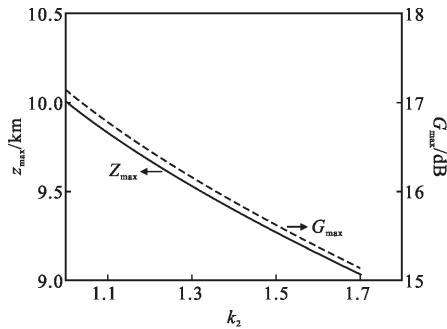


图 5 同向抽运 FRA 中  $z_{\max}$ 、 $G_{\max}$  与  $k_2$  的关系图

Fig.5 Relation of  $z_{\max}$ ,  $G_{\max}$  and  $k_2$  for forward-pumped FRA

## 1.2 反向抽运光纤拉曼放大器的最大拉曼增益

反向抽运 FRA 中, 可以忽略抽运光转移给信号光的能量, 即不考虑公式(2)等号右边第一项(因为不忽略时, 信号光的传输将会受到抽运光波动的影响而波动, FRA 不能长期地稳定工作), 此时, 联立方程(1)、(2), 可得:

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[ \frac{g_R \cdot P_p(L)}{A_{\text{eff}} \cdot \alpha} \cdot \exp(-\alpha L) \cdot (\exp(\alpha z) - 1) - \alpha z \right] \quad (8)$$

由参考文献[8]知, 反向抽运 FRA 放大的信号光存在将被放大的微弱信号功率最低值, 此时对应光纤作用长度可表示为  $z_{\min}$ ,  $z_{\min}$  由公式(8)对  $z$  求微分而得到, 即:

$$z_{\min} = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{\alpha \cdot A_{\text{eff}}}{g_R \cdot P_p(L)} + L \quad (9)$$

反向抽运 FRA 放大信号的过程存在于光纤上的  $z_{\min}$  到  $L$  处, 在这段光纤上体现了反向抽运 FRA 对信号光的最大放大能力, 即取得最大拉曼增益值, 结合公式(6)将其最大拉曼增益定义为:

$$G_{\max} = 10 \lg \frac{P_s(L)}{P_s(z_{\min})} \quad (10)$$

由公式(8)、(9)和(10)推导出反向抽运 FRA 的最大拉曼增益的解析式, 将其简化, 得到:

$$G_{\max} = 4.343 \cdot (k_1 \cdot P_p(L) / \alpha - 1 + \ln(\alpha / (k_1 \cdot P_p(L)))) \quad (11)$$

可以看出, 反向抽运 FRA 的最大拉曼增益受到 3 个因素的影响, 即  $P_p(L)$ 、 $\alpha$ 、 $k_1$ 。以下是由数值计算得到的各个参数对反向抽运 FRA 最大拉曼增益的影响图示(各个参数的取值与同向抽运 FRA 最大拉曼增益的计算取值相同)。

### 1.2.1 $P_p(L)$ 对反向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 6 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $P_p(L)$  增加而增加, 增加的速度稍微加快。这与理论上抽运光是 FRA 放大信号的能量之源是一致的, 和抽运光对开关增益的影响也一致<sup>[10]</sup>。

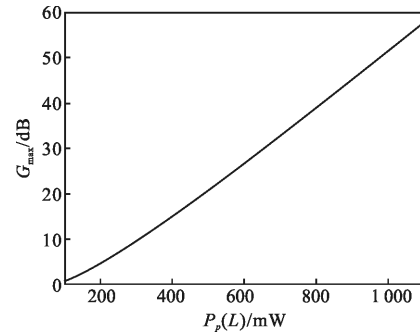


图 6 反向抽运 FRA 中  $G_{\max}$  与  $P_p(L)$  的关系图

Fig.6 Relation of  $G_{\max}$  and  $P_p(L)$  for backward-pumped FRA

### 1.2.2 $\alpha$ 对反向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 7 表示出它们的关系, 可以看出,  $G_{\max}$  随着  $\alpha$  增加而减小, 减小的速度是先快后慢。每增加 0.04 dB/km 的损耗, 起初  $G_{\max}$  减小 13 dB, 后来  $G_{\max}$  减小不到 3 dB。说明光纤损耗系数较低时,  $G_{\max}$  受其

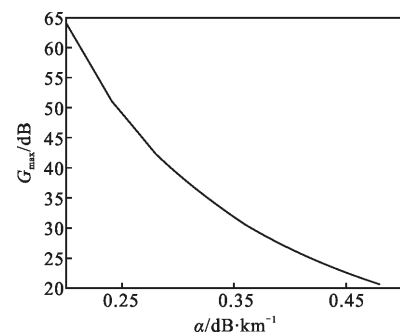


图 7 反向抽运 FRA 中  $G_{\max}$  与  $\alpha$  的关系图

Fig.7 Relation of  $G_{\max}$  and  $\alpha$  for backward-pumped FRA

影响大,受激拉曼散射占主导地位;当光纤损耗系数较大时, $G_{\max}$  受其影响小,光纤损耗消耗抽运光相当一部分的能量。

### 1.2.3 $k_1$ 对反向抽运 FRA $G_{\max}$ 的影响

由图 8 表示出它们的关系,可以看出, $k_1$  对反向抽运 FRA 的  $G_{\max}$  影响非常显著。 $G_{\max}$  随着  $k_1$  增加而迅速增加。当  $k_1$  很小时(典型值取到  $0.05 \frac{1}{\text{W} \cdot \text{km}}$ ),  $G_{\max}$  的值非常小;当  $k_1$  增大到一定值(典型值取到  $0.5 \frac{1}{\text{W} \cdot \text{km}}$ ),  $G_{\max}$  增加到 30 dB 以上;随后, $G_{\max}$  随着  $k_1$  增加而线性增加。这说明在一定程度上, $G_{\max}$  的值取决于  $k_1$ 。从 FRA 的原理角度来看, $k_1$  是单位面积取得的拉曼增益,所以对  $G_{\max}$  有重要影响作用。

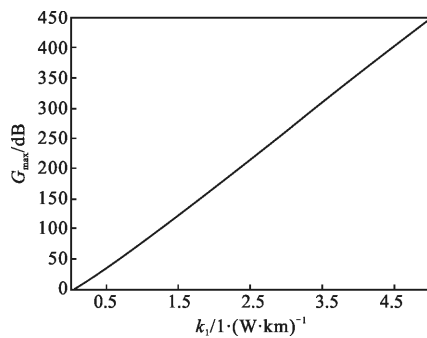


图 8 反向抽运 FRA 中  $G_{\max}$  与  $k_1$  的关系图

Fig.8 Relation of  $G_{\max}$  and  $k_1$  for backward-pumped FRA

## 2 结果对比与讨论

从各个参数对最大拉曼增益的影响来看,各参量对同向抽运和反向抽运 FRA 最大拉曼增益的影响有相同的地方,也有不同的地方。

两者相同的地方:(1)  $k_1$  越大, $G_{\max}$  越大。 $G_{\max}$  与  $k_1$  的变化密切相关,说明具有不同  $k_1$  值的不同光纤所获得的  $G_{\max}$  差别很大,选用  $k_1$  值大的光纤制作 FRA 时能够获得较大的  $G_{\max}$ 。参考文献[3]利用  $\text{BaWO}_4$  具有高  $k_1$  值的特性研究了可以用于国防事业中激光雷达等方面的放大脉冲信号的 FRA,可以作为这方面的实验证明;(2) 初始抽运光功率越大, $G_{\max}$  越大。 $G_{\max}$  与初始抽运光功率的正向关系说明了抽运源对于 FRA 是非常重要的。参考文献[7]指出 FRA 的应用技术发展取决于抽运源的发展技术;(3) 光纤损耗系数越大, $G_{\max}$  越小, $G_{\max}$  与光纤损耗系数的反向关系说明了 FRA 中,光纤本身的损耗系数消耗了相当一部分能量。

两者不同的地方:(1) 因为两种抽运方式下的参数取值相同,对比图 6~8 与图 2~4 可得:反向抽运 FRA 的  $G_{\max}$  高于同向抽运 FRA 的  $G_{\max}$ ;(2) 对比图 7 与图 3 可得: $G_{\max}$  随光纤损耗系数增加而减小的速度不同,反向抽运 FRA 的  $G_{\max}$  受光纤损耗系数的影响更大;(3) 反向抽运 FRA 的  $G_{\max}$  与  $k_2, P_s(0)$  无关,同向抽运 FRA 的  $G_{\max}$  随着  $k_2, P_s(0)$  数值的增加而减小。两者不同的部分原因是反向抽运 FRA 在理论推导过程中略去了抽运光转移给信号光的能量。

另外,FRA 的最大拉曼增益和开关增益是有区别的。最大拉曼增益着重考虑器件的原理能提供的最大增益,而开关增益着重考虑通信线路中是否有这个器件引起的增益落差。与参考文献[10]进行比较可知,影响两者的参数不尽相同,相同的参数对两者的影响也不同。

## 3 结论

同向抽运 FRA 中信号被放大主要发生在光纤长度  $0 \sim z_{\max}$  内,在  $z_{\max}$  处达到最大拉曼增益;反向抽运 FRA 中能对信号产生放大作用的光纤长度主要位于  $z_{\min} \sim L$  内,在这段光纤上达到最大拉曼增益。如果将这两者单独或者联合运用于光纤通信系统中,使得同向抽运 FRA 放大信号的跨距设计为  $z_{\max}$ ,反向抽运 FRA 放大信号的跨距设计为  $L \sim z_{\min}$ ,那么 FRA 都会工作在最大拉曼增益的情况下,器件的抽运效率将达到最大,光纤通信系统的无中继传输距离将达到最大值。此时,对于器件制造商和通信运营商来说,光纤通信系统的成本将是最低的。

文中所得到的各个参数对同向抽运 FRA 和反向抽运 FRA 最大拉曼增益的影响在实验、中继距离计算和系统成本预算中有很重要的参考意义,为 FRA 器件的进一步研究提供了参考。

### 参考文献:

[1] Zhang Hanwei, Xiao Hu, Zhou Pu, et al. High power Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2014, 22: 10248-10255.

[2] Czyzak P, Mazurek P, Turkiewicz J P. 1 310 nm Raman amplifier utilizing high-power, quantum-dot pumping lasers [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 64: 195-203.

[3] Cong Wang, Zhenhua Cong, Zhaojun Liu, et al. Theoretical

- and experimental investigation of an efficient pulsed barium tungstate Raman amplifier at 1 180 nm [J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 80–84.
- [4] Huang Bichang, Gao Zhihui, Hong Zehua, et al. Simulation of fiber Raman amplifiers by one dimension FDTD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 334–338. (in Chinese)  
黄必昌, 高致慧, 洪泽华, 等. 光纤拉曼放大器瞬态效应的时域差分研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 334–338.
- [5] Tan Yong, Zhang Xihe, Sun Xiuping. Backward spontaneous Raman scatter noise in the fiber Raman amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 440–442. (in Chinese)  
谭勇, 张喜和, 孙秀平. 光纤拉曼放大器中的后向自发拉曼散射噪声[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 440–442.
- [6] Amnon Yariv, Pochi Yeh. *Photonics-optical Electronics in Modern Communications* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009, 691–697. (in Chinese)
- [7] Headley C, Agrawal G P. *Raman Application in Fiber Optical Communication Systems* [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005: 4–6.
- [8] Long Qingyun, Wu Tingwan, Hu Sumei, et al. Comparison of threshold between forward-pumped and backward-pumped fibre Raman amplifier[J]. *Laser Journal*, 2014, 35(4): 3–4. (in Chinese)  
龙青云, 吴庭万, 胡素梅, 等. 同向与反向抽运光纤喇曼放大器的阈值比较[J]. 激光杂志, 2014, 35(4): 3–4.
- [9] Long Qingyun, Wu Tingwan, Deng Huaqiu. The analysis of critical condition of fiber raman amplifier [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(1): 35–37. (in Chinese)  
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.
- [10] Long Qingyun, Deng Huaqiu. Comparison of gain between forward-pumped and backward-pumped fibre Raman amplifier [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(5): 655–658. (in Chinese)  
龙青云, 邓华秋. 同向与反向抽运光纤拉曼放大器的增益比较[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 655–658.