

doi:10.3788/gzxb20134212.1408

喇曼光纤放大器的增益谱平坦技术

巩稼民¹, 左旭², 袁心易¹, 徐军华³, 方健¹

(1 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

(2 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

(3 西安邮电大学 理学院, 西安 710121)

摘要:放大器的增益谱平坦性是波分复用系统设计中一项十分重要的参量. 本文推导了 N 段光纤级联实现增益谱平坦的分析理论, 得到每段光纤的有效作用距离和喇曼功率增益系数的约束条件. 当喇曼增益谱拟合为线性时, 简化了其实现增益谱平坦的条件, 并给出了两段光纤级联信号光获得增益的最优值. 以纯石英光纤和掺磷石英光纤级联的模型为例, 利用 Matlab 进行了数值分析验证, 结果表明: 随着第一段光纤长度的增加, 信号光获得的增益先增加再减小; 当第一段光纤取 7.15 km 时, 信号光获得了 5.78 dB 的平均最大增益和 0.45 dB 的增益平坦度, 并得到泵浦光功率与信号光增益呈正相关性. 最后, 以三段不同材料光纤级联为例, 利用 Matlab 进行了分析验证, 信号光经过放大后获得了 7.74 dB 的平均增益和 0.57 dB 的增益平坦度, 证明了理论分析的可行性. 该方案为增益平坦化的喇曼光纤放大器设计提供了一种新的思路.

关键词:喇曼光纤放大器; 波分复用系统; 级联光纤; 增益谱平坦

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1408-6

Gain Spectrum Flatness in Raman Fiber Amplifier

GONG Jia-min¹, ZUO Xu², YUAN Xin-yi¹, XU Jun-hua³, FANG Jian¹

(1 School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(2 School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(3 School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Gain-flatness is a crucial parameter in wavelength division multiplexing system design. In this paper, the gain flattened theory by using multi-stage cascaded fiber was presented. The effective distance and Raman gain coefficient constraints were calculated. When spectrum was fitted by linear lines, the gain-flattened condition was simplified. The optimal gain value was obtained by cascading two stage fibers. The pure silica fiber and phosphorus-doped fiber were cascaded as the typical example. The results show that with the increasing length of the first stage fiber, the signal gain was firstly increased and then reduced; when the first fiber length was 7.15 km, 5.78 dB average maximum gain and 0.45 dB gain flatness were provided by Matlab. Pump power and signal gain was positively correlated. Three stage fibers were cascaded with different materials as the last example. 7.74 dB average gain and 0.57 dB flatness were verified by Matlab which proves the accuracy of the theory. This scheme provides a novel way to design gain flattened Raman fiber amplifier.

Key words: Raman fiber amplifier; Wavelength division multiplexing; Cascaded fiber; Gain flatness

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61201193)和西安市科技计划项目(No. CX12188)资助

第一作者: 巩稼民(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光通信. Email: gjm@xupt.edu.cn

通讯作者: 左旭(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信. Email: 2008zx1215@163.com

收稿日期: 2013-05-02; 录用日期: 2013-06-05

0 引言

近些年来,随着数据业务的飞速发展,人们对带宽服务的要求不断提高,这要求光纤通信网络向大容量、超高速、宽带化的方向发展^[1-3].全光放大器是光纤通信系统中的重要器件,它将衰弱的光信号重新放大以适应超长距离传输的要求.相对于其它放大器,喇曼光纤放大器(Raman Fiber Amplifier, RFA)自身拥有许多优势,例如:响应时间快、饱和输出功率大、易于与实际光纤链路耦合等^[4],并且 RFA 的增益谱线很宽,可以改变泵浦光频率在一定范围内实现全波段的放大^[5-6],对于光纤通信系统的进一步发展起着关键性的作用^[7].

目前国内主要集中于密集波分复用系统(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)中的 RFA^[8],但是 RFA 的商用强烈依赖于两个方面^[9]:大功率抽运源和足够平坦的增益谱.目前主要的增益平坦方法有^[10]:增益均衡技术、混合光纤放大器技术、多波长泵浦技术、光纤级联技术,但这些技术都各有缺点,如结构复杂、不易控制、成本高等.对于光纤级联实现增益谱平坦的技术,前人也只是采用两段近似线性增益谱的光纤来做的^[10].

本文深入探讨了光纤级联技术,得到了 N 段光纤级联实现增益谱平坦的分析理论,并给出了三段光纤级联实现增益谱平坦的设计方案,为级联 RFA 提供了一种新的思路.

1 原理及模型

1.1 受激喇曼效应

喇曼散射现象由印度科学家 Raman 在 1928 年首次发现^[11],即一个频率是 ν_0 的泵浦光激发介质分子到虚能态,经过极短的时间(皮秒量级)后,介质分子迅速衰减到一个更低的能级上,并发射一个频率是 ν_s ($\nu_s = \nu_0 - \nu_V$) 的信号光.这个过程被称为“斯托克斯喇曼散射”.与此同时,若介质分子在高能态上,当泵浦光入射,并经过皮秒在虚能态的短暂停留后,发射一个频率 ν_{as} ($\nu_{as} = \nu_0 + \nu_V$) 的信号光,这个过程被称为“反斯托克斯散射”.如图 1^[12].此外,若存在相干泵浦光,且又足够的高能量,散射光就会迅速增大,大部分的泵浦光都会转化成为散射光.这个过程称为“受激喇曼散射”(Simulated Raman Scattering, SRS)效应.

当泵浦光与信号光耦合到一根光纤中去,只要它们之间的频移在喇曼增益谱范围内,泵浦光就会把能量传递给信号光,从而使信号光功率得到放大,

这就是喇曼放大过程^[13].SRS 的放大带宽可以覆盖整个近红外区,在通信和超连续谱产生等领域得到广泛的应用^[14].SRS 的增益介质就是光纤,所以结构比较简单,并且其放大是沿光纤分布而不是集中的,可以减少四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)的干扰.SRS 过程还具有噪音系数低,响应速度快的特点^[15].

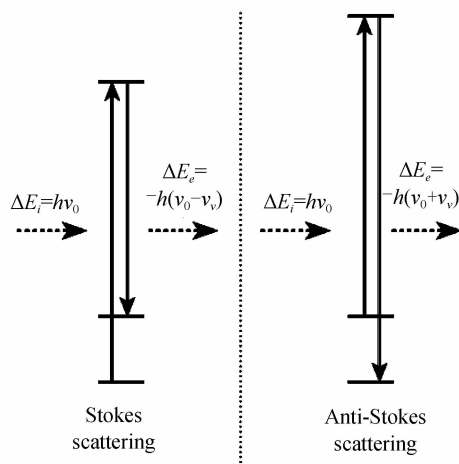


图 1 斯托克斯散射与反斯托克斯散射

Fig. 1 Stokes scattering and Anti-Stokes scattering

1.2 放大器模型

如图 2 所示:RFA 是由 n 个输入光、合波器、分波器以及 N 种不同材料的光纤级联构成的.当大功率泵浦光 λ_p 和等输入功率的信号光 λ_i 经过第一段光纤传输后,由于不同波长信号光的增益系数不同,各信号功率将不再相等.然后将经过第一段光纤输出的光信号再注入到第二段光纤中,以此类推,信号从第 N 段光纤输出,由于 N 段光纤材料不同,即喇曼增益谱不同,每个信号光功率经过 N 段光纤得到了不同程度的放大,所以可以通过合理的系统参数配置使得最后各信号光获得等值放大输出,这就是该种放大器模型的工作原理.

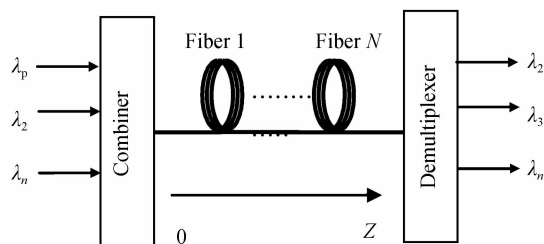


图 2 单泵浦级联喇曼光纤放大器

Fig. 2 A single pumped cascaded Raman fiber amplifier

2 理论推导

2.1 析理论

基于图 2 的放大器模型来分析这种放大器实现增益平坦的条件,推导如式(1)

$$\begin{cases} \frac{dn_i(z)}{dz} = -\alpha n_i(z) + \sum_{j=1}^N r_{ij} n_j(z) n_i(z) & (i=1 \cdots N) \\ n_i(z)|_{z=0} = n_i(0) & (i=1 \cdots N) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为 N 信道单向稳态 SRS 耦合方程^[16], 其中 $n_i(z)$ 为各信道在 z 处入射的光子通量, α 为光信号对应光纤的线性衰减系数, r_{ij} 为 i, j 信道之间光子通量的喇曼增益系数.

合理假设: 在放大器的情况下, 泵浦光功率 $P_1(z) \gg P_i(z)$ ($i \neq 1$); 因此只考虑泵浦波与信号光之间 SRS 相互作用, 而信号光之间的 SRS 相互作用可以忽略; 所有输入信号光的平均频率近似等于泵浦光功率, 所有信道初始输入的功率之和近似等于初始泵浦光信号功率; 并且信号光对泵浦光的 SRS 影响不大, 也可以忽略不计, 这样泵浦光近似成指数衰减, 即

$$P_1(z) = P_1(0) e^{-\alpha z} \quad (2)$$

将式(2)代入方程(1), 经过推导并将光子通量化为功率的形式, 经过合理假设的简化可以得出一种光纤中 z 处各信道光功率的表达式为

$$P_i(z) = P_i(0) e^{-\alpha z + \frac{g_{i1}}{MA_e} P_1(0) L_e} \quad (3)$$

式中, g_{i1} 是喇曼功率增益系数, M 为保偏系数, A_e 为光纤的有效截面积, L_e 为光纤有效作用距离, $P_1(0)$ 为泵浦光功率.

现在设有 N 段光纤, 每段光纤长度、线性衰减系数分别为 L_j, α_j ($j=1, 2 \cdots N$), 其他参量相同; 则在光纤 L_1 处, 各信号光功率

$$P_i(L_1) = P_i(0) e^{-\alpha_1 L_1 + \frac{g_{i1}}{MA_e} P_1(0) L_{e_1}} \quad (4)$$

g_{i1} 是第 j 段光纤的喇曼功率增益系数.

那么在光纤 $z=L_1+L_2$ 处, 各信号光功率为

$$P_i(L_1+L_2) = P_i(0) \exp(-\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 + \frac{g_{i1}}{MA_e} P_1(0) L_{e_1} + \frac{g_{i2}}{MA_e} P_1(0) \exp(-\alpha_1 L_1) L_{e_2}) \quad (5)$$

同理在 $z=\sum_{j=1}^N L_j$ 光纤处, 令 $Y=\sum_{j=1}^N L_j$, 各信号功率为

$$P_i(z)|_{z=Y} = P_i(0) \exp(-\sum_{j=1}^N \alpha_j L_j + \frac{P_1(0)}{MA_e} (\sum_{j=1}^N g_{ij} L_{e_j} \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} \alpha_m L_m))) \quad (6)$$

式中 $\alpha_0 L_0=0$, 为了实现增益平坦, 则有

$$\sum_{j=1}^N g_{ij} L_{e_j} \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} \alpha_m L_m) = W \quad (7)$$

W 是与信号光的波数 ν_i 无关的常量. 信号光获得的增益值为

$$G = 10 \log \frac{P_i(z)|_{z=Y}}{P_i(0)}$$

$$10 \log \left\{ \exp \left(\left(-\sum_{j=1}^N \alpha_j L_j \right) + \frac{P_1(0)W}{MA_e} \right) \right\} \quad (8)$$

式(7)给出了 N 段光纤级联实现增益平坦的分析理论, 式子表明喇曼功率增益系数和光纤有效作用距离的约束条件. 如果已知 N 段光纤的喇曼增益谱线函数, 那么根据式(7)调整每段光纤的长度就可以实现增益谱平坦化.

2.2 简化理论

$g_j(\Delta\nu)$ 是第 j 段光纤的喇曼功率增益谱, 假设 $g_j(\Delta\nu)$ 是线性的, 即 $g_j(\Delta\nu) = k_j \Delta\nu + b_j$, 其中 k_j 为第 j 段光纤在频移范围内拟合直线的斜率. 由于只考虑泵浦光与信号光的 SRS 作用, 则 $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_i$, 即有

$$g_{ij} = k_j(\nu_1 - \nu_i) + b_j \quad (9)$$

把式(9)代入式(7), 可得到

$$\sum_{j=1}^N (k_j \nu_1 + b_j) \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} a_m L_m) L_{e_j} - \sum_{j=1}^N (k_j \nu_i) \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} a_m L_m) L_{e_j} = W \quad (10)$$

式(10)中只要有

$$\sum_{j=1}^N k_j \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} a_m L_m) L_{e_j} = 0 \quad (11)$$

那么 W 将会是与信号光的波数 ν_i 无关的常量, 从而实现了增益平坦. 式(11)表明: 当给定光纤的线性衰减系数, 仅约束着每段光纤的长度和喇曼增益谱线拟合直线的斜率的关系, 即在图 2 所示的模型中, 只要选取合适的光纤及其长度, 便可实现增益平坦, 这是 N 段光纤级联增益平坦的条件. 从中可以看出增益平坦与初始输入的泵浦功率无关, 此时信道增益可以进一步化简为

$$G = 10 \log \frac{P_i(z)|_{z=Y}}{P_i(0)} = 10 \log \exp \left[\frac{P_1(0)}{MA_e} \left(\sum_{j=1}^N b_j L_{e_j} \cdot \exp(-\sum_{m=0}^{j-1} \alpha_m L_m) - \sum_{j=1}^N \alpha_j L_j \right) \right] \quad (12)$$

3 讨论与分析

3.1 两段光纤级联

首先讨论 N 段光纤级联实现增益平坦, 现取其中的两段光纤来做仿真验证, 即以纯石英光纤和掺磷石英光纤级联为例, 对其传输特性进行性能仿真. 光纤长度和有效作用距离分别为: $L_1, L_{e_1}, L_2, L_{e_2}$.

式(11)可以化简为

$$k_1 L_{e_1} + k_2 \exp(-\alpha_1 L_1) L_{e_2} = 0 \quad (13)$$

式(12)可以化简为

$$G = 10 \log \exp \left\{ -\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 + \frac{P_1(0)}{MA_e} (b_1 L_{e_1} + b_2 L_{e_2} \exp(-\alpha_1 L_1)) \right\} \quad (14)$$

3.1.1 信号光功率随光纤长度的变化分析

图 3 是几种不同材料光纤的喇曼增益谱^[17].

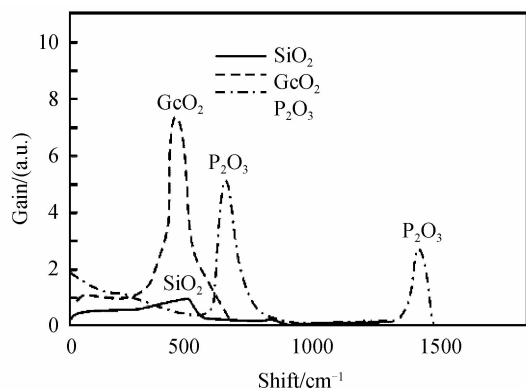
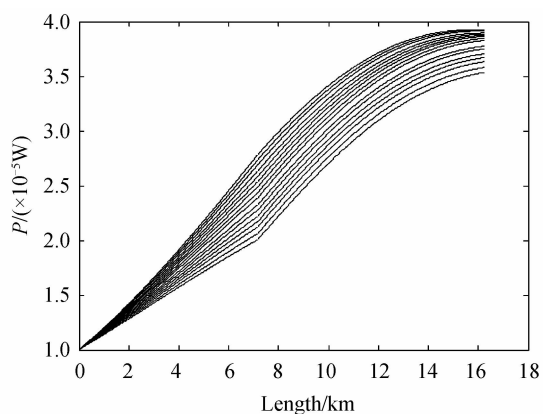


图 3 几种材料的石英光纤喇曼增益谱

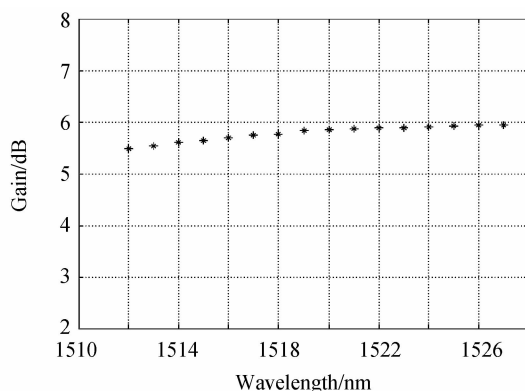
Fig. 3 Raman gain spectrum in different doped silica fibers

可以看到在 $[0, 500] \text{ cm}^{-1}$ 的频移范围内,纯石英光纤(SiO_2)和掺磷石英光纤(P_2O_5)的增益谱都具有较好的线性和互补特性,现在 $[280, 350] \text{ cm}^{-1}$ 频移范围内对其进行直线拟合,带来的相对误差不会超过 1%. 得到纯石英光纤、喇曼谱线的拟合斜率 $k_1 = 1.83 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$, 掺磷石英光纤喇曼谱线的拟合斜率 $k_2 = -2.70 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$, 截距 $b = 1.65 \times 10^{-13} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$; 泵浦光的波长取 $\lambda = 1450 \text{ nm}$, 功率 $P = 600 \text{ mW}$. 假设有 16 个信道的复用信号光, 相邻信道之间的间隔为 1.0 nm , 信号光的波长区间为 $[1512, 1527] \text{ nm}$, 设信号的初始输入功率均为 0.01 mW . 光纤有效截面积均为 $A_e = 5.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 保偏系数均为 $M = 2$, 两段光纤的泵浦光衰减系数分别为 $\alpha_1 = 0.28 \text{ dB/km}$, $\alpha_2 = 0.4 \text{ dB/km}$. 取第一段石英光纤的长度 $L_1 = 7.15 \text{ km}$, 根据式(13)解得 $L_2 \approx 9.09 \text{ km}$. 考虑到不同波长的衰耗也不同, 通过 Matlab 数值仿真得到图 4.

如图 4 所示, 当具有相同功率的 16 个信道的复用信号光经过第一段光纤后增益各不相同, 但继续经过第二段光纤传输后其各个信号增益值的差距没有继续扩大, 反而接近, 在不考虑其它非线性影响的情况下, 各信号光所得到的增益平均为 5.78 dB , 增



(a) Signal power variation with transmission length



(b) Signal gain in different wavelength

图 4 各信道信号功率变化及其增益

Fig. 4 Channel signal power and its gain

益平坦度为 0.45 dB , 由上图可知得到了较好的增益平坦度, 说明了分析理论的可行性.

3.1.2 光纤长度对增益的影响

由光纤长度与有效作用距离之间的关系可得

$$L_2 = [-\ln(1 - a_2 L_{e_2})] / \alpha_2$$

由于 $L_2 > 0$, 于是可以得到

$$0 < L_{e_2} < 1 / \alpha_2$$

将上式代入(13)式化简得

$$L_1 < \left[\ln \left(\frac{a_2 k_1}{a_2 k_1 - a_1 k_2} \right) \right] / (-\alpha_1) \quad (15)$$

式(15)说明为了满足增益平坦的条件, 第一段光纤 L_1 必须满足以上条件才可以. 在进行喇曼放大器设计时, 应当注意光纤的最大长度, 否则无论 L_2 取何值, 都无法达到增益平坦.

由式(13)、(14)可知, 第一段光纤长度确定后, 第二段光纤长度也就确定了, 它们的长度是呈正相关变化的, 所以在考虑光纤距离对增益的影响时, 只考虑第一段石英光纤的长度即可. 在给定两根光纤的喇曼增益谱拟合曲线和泵浦光功率时, 就以上面纯石英光纤和掺磷石英光纤的喇曼增益谱为例, 信号光功率的增益随着第一段光纤的长度变化如图 5 所示, 喇曼光纤放大器的增益开始随着光纤长度的增加而增加, 当增加到一定的数值时, 增益将随之而减小.

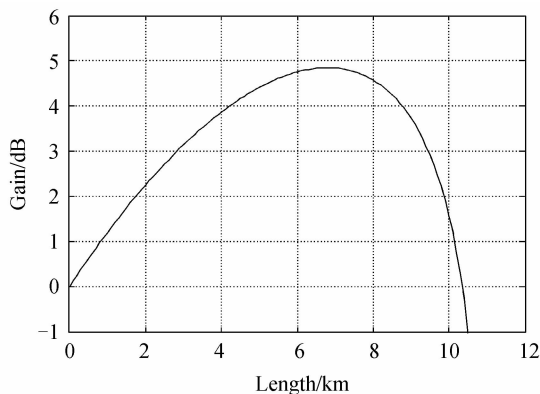


图 5 光纤长度对增益的影响

Fig. 5 Gain impact from fiber length

如图5所示,当第一段石英光纤长度约为7 km时信号光获得的增益达到最大,后面光纤再增长,由于放大部分的系数在减小而衰减却一直持续,因此输出增益就会相应降低.另外可以看出当第一段光纤长度超过11 km后增益就为负值了,这也是式(15)所限定的.

从式(13)、(14)可以推出信号光获得最大增益时 L_1 的值为

$$L_1 = -\frac{1}{\alpha_1} \ln \left(-\left((-k_2 \alpha_1^2 + k_1 \alpha_1 \alpha_2) MA_e + (b_1 - (k_1/k_2)b_2) \alpha_2 k_1 P_1(0) \right) / \left((b_1 - (k_1/k_2)b_2) \cdot (k_2 \alpha_1 - k_1 \alpha_2) P_1(0) \right) \right) \quad (16)$$

$P_1(0)$ 是泵浦光功率, α_1, α_2 分别是第一、第二段光纤的衰减系数, k_1, k_2, b_1, b_2 分别是第一、第二段光纤拟合直线的斜率和截距.

把纯石英光纤和掺磷石英光纤的喇曼增益谱拟合参量代入式(16),得到 L_1 长度为7.15 km, 对应 L_2 的长度约等于9.09 km. 即在第一段光纤长度取7.15 km时,光信号获得的增益值最大,这与图5完全吻合. 无论是几段光纤级联,总会有一个最优的增益值.

3.1.3 泵浦光功率对增益的影响

如图6所示,喇曼光纤放大器的增益与泵浦光功率的大小有关.在其它参量给定的情况下,泵浦功率越大时,所得到的增益也越高,几乎是接近于直线方式的增大,泵浦光功率与输出增益呈正相关性.从式(14)可以看出泵浦光功率对信号增益的影响是非常大的,实际应用中,这种单泵浦放大器需要的泵浦光功率是较大的,这样才能获得较大的增益.

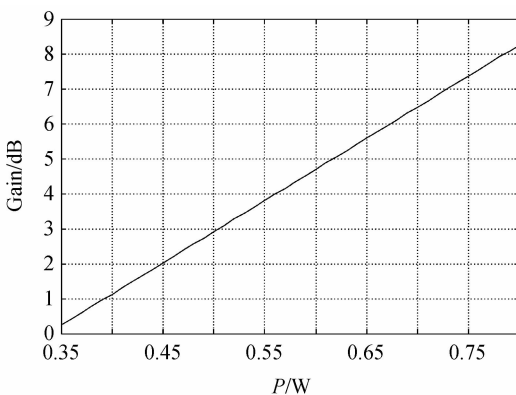


图6 泵浦光功率对增益的影响

Fig. 6 Gain impact from pump power

3.2 三段光纤级联

在讨论了两段光纤级联实现增益谱平坦情的基础上,模拟三段不同材料的光纤级联,对其传输特性进行仿真分析.

光纤长度和有效作用距离分别为: $L_1, L_{e_1}, L_2, L_{e_2}, L_3, L_{e_3}$.

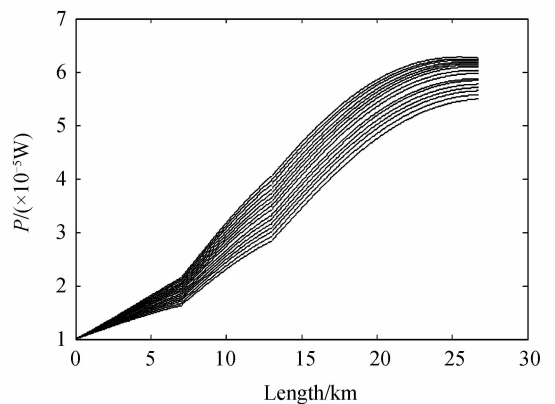
式(11)可以化简为

$$k_1 L_{e_1} + k_2 \exp(-\alpha_1 L_1) L_{e_2} + k_3 \exp(-\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2) L_{e_3} = 0 \quad (17)$$

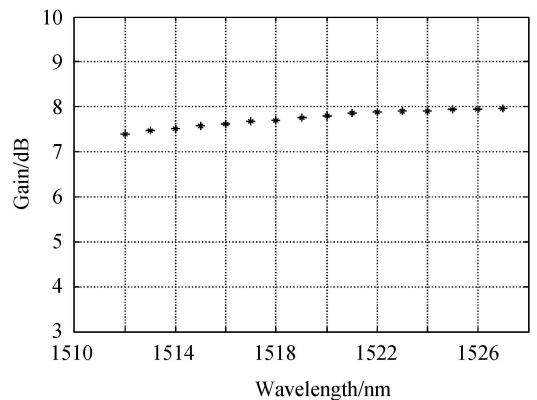
式(12)可以化简为

$$G = 10 \log \exp \left\{ -\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 - \alpha_3 L_3 + \frac{P_1(0)}{MA_e} \cdot (b_1 L_{e_1} + b_2 L_{e_2} \exp(-\alpha_1 L_1) + b_3 L_{e_3} \exp(-\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2)) \right\} \quad (18)$$

假设在 $[200, 400] \text{ cm}^{-1}$ 的频移范围里对其喇曼谱线进行直线拟合,得到三段光纤的拟合斜率分别为: $k_1 = 1.5 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$, $k_2 = 1 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$, $k_3 = -3.5 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$; 三段光纤的截距分别为: $b_1 = 0$, $b_2 = 0.64 \times 10^{-13} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$; $b = 2.25 \times 10^{-13} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$; 泵浦光的波长取 $\lambda = 1450 \text{ nm}$, 功率 $P = 600 \text{ mW}$. 假设有16个信道的复用信号光,相邻信道之间的间隔为1.0 nm,信号光的波长区间为 $[1512, 1527] \text{ nm}$, 设信号的初始输入功率均为0.01 mW. 光纤有效截面积均为 $A_e = 5.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 保偏系数均为 $M = 2$, 三段光纤泵浦光衰减系数分别为 $\alpha_1 = 0.28 \text{ dB/km}$, $\alpha_2 = 0.4 \text{ dB/km}$, $\alpha_3 = 0.3 \text{ dB/km}$. 取 $L_1 = 7 \text{ km}$, $L_2 = 6 \text{ km}$, 代入式(17)便可求得 $L_3 \approx 13.74 \text{ km}$. 考虑到不同波长的衰耗也不同,通过Matlab数值仿真得到图7.



(a) Signal power variation with transmission length



(b) Signal gain in different wavelength

图7 各信道信号功率变化及其增益

Fig. 7 Channel signal power and its gain

如图7所示,当具有相同功率的16个信道的复

用信号光经过第一段、第二段光纤后增益各不相同,但继续经过第三段光纤传输后其各个信号光增益值的差距没有继续扩大,反而在接近,在不考虑其它非线性影响的情况下,各信号光所得到的增益平均为 7.74 dB,增益平坦度为 0.57dB,由上图可知得到了较好的增益平坦度,这进一步证明了分析理论的可行性。

如图 8 所示,喇曼光纤放大器的增益与泵浦光功率的大小有关,它与两段光纤级联情况类似,几乎是接近于直线方式的增大,它们是呈正相关性的。

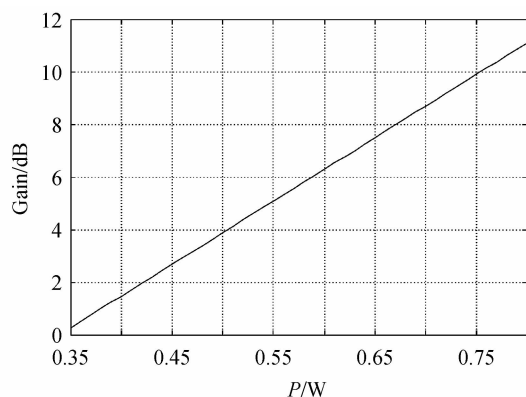


图 8 泵浦光功率对增益的影响

Fig. 8 Gain impact from pump power

4 结论

利用光纤级联实现增益平坦是一种新的有效方法,本文给出了 N 段光纤级联实现增益平坦的分析理论,以及喇曼增益谱拟合为直线情形下的平坦条件,并以纯石英光纤与掺磷石英光纤级联的喇曼放大器模型为例,计算出了信号光获得增益最优值。通过 Matlab 仿真验证,当第一段光线取 7.15 km 时,得到了平均为 5.78 dB 的最大增益和 0.45 dB 的增益平坦度,并得到泵浦光功率与信号光增益呈正相关性;最后又以三段光纤级联为例,通过 Matlab 仿真验证,得到了平均为 7.74 dB 的增益和 0.57 dB 的增益平坦度,证明了分析理论的可行性。该方案的优点在于整体结构简单,并且相对于传统采用多泵浦光源放大器,只用了一个泵浦光,节省了泵浦光源,成本大大降低。本文所述喇曼光纤放大器理论,理论上适合任意 N 种具有增益特性互补的光纤级联来构成增益平坦喇曼光纤放大器,因此设计制造不同材料的新型光纤并配置成具有如上增益互补特性的级联光纤放大器可以成为一个主要的研究目标。

参考文献

[1] WEN Lei, CHEN Wei, ZHANG Li-yan, *et al.* Raman scattering characteristics of tellurite glass used as broadband raman amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup1): 178-180.
温磊,陈伟,张丽艳,等.一种带宽喇曼放大碲酸盐玻璃的喇曼散射特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(Sup1): 178-180.

[2] MASUDA H. Review of wide-band hybrid amplifiers [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2000, **1**: 2-4.
[3] XU Li-song, PERROS H, ROUSKAS G. Techniques for optical packet switching and optical burst switching[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, **39**(1): 136-142.
[4] 方强,梁猛. *光纤通信* [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003: 46-50.
[5] YU Juan, LIN Hong-rong, SHEN Xiao-qiang. Investigating the performance of raman amplifiers in high-speed dispersion compensation systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 683-687.
于娟,林洪榕,沈小强. 高速色散系统中喇曼放大器性能研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(6): 683-687.
[6] ISLAM M. Raman amplifiers for telecommunications [M]. New York: Springer-Verlag Inc. 2004.
[7] DENG Hua-qi, LONG Qing-yun. Theoretical analysis on srs in single-mode fibers pumped by laser of 1064nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 46-50.
邓华秋,龙青云. 1064nm 激光抽运单模光纤受激喇曼散射的理论分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 46-50.
[8] TONG Zhi, WEI Huai, JIAN Shui-sheng. Optimal design of distributed Raman amplifiers employed in long-haul optical transmission systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4): 1873-1882.
童治,魏淮,简水生. 分布式光纤喇曼放大器在长距离光传输系统中的优化设计[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4): 1873-1882.
[9] YANG Tao-tao, YIN Xin-da, HE Wan-hui, *et al.* Gain spectrum of raman fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1336-1339.
杨滔滔,印新达,何万晖,等. 喇曼光纤放大器增益谱特性研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1336-1339.
[10] GONG Jia-min, MA Xiao-juan. Fiber amplifier gain flattening review[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2010, **15**(1): 86-89.
巩稼民,马晓娟. 喇曼光纤放大器的增益平坦化综述[J]. *西安邮电学院学报*, 2010, **15**(1): 86-89.
[11] RAMAN C, KRISHMAN K. A new class of spectra due to secondary radiation[J]. *Indian Journal of Physics*, 1928, **2**: 399-419.
[12] BRUMAGE J. Raman amplification for fiber communication systems [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003, **2**: 156-157.
[13] GONG Hua-ping, ZHANG Zai-xuan, JIN Yong-xin. Experiment study on fiber brillouin amplifier and fiber raman amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup. 2): 94-96.
龚华平,张在宣,金永新. 光纤布里渊散射光子放大器和光纤喇曼散射光子放大器[J]. *光子学报*, 2008, **37**(Sup. 2): 94-96.
[14] XU Jiang-ming, LENG Jin-yong, HAN Kai, *et al.* Experimental research on single-frequency fiber Raman Amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(7): 074204.
许将明,冷进勇,韩凯,等. 单频光纤喇曼放大器的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(7): 074204.
[15] LIU Yun, LIU Yu-gui. Discussion and applications of fiber raman amplifiers[J]. *Communications Technology*, 2008, **41**(4): 1-3.
刘云,刘玉贵. 光纤喇曼放大器的深入探讨及应用[J]. *通信技术*, 2008, **41**(4): 1-3.
[16] GONG Jia-min. Stimulated Raman and Brillouin scattering effect in single-mode silica fiber in density wavelength division multiplexed optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an JiaoTong University, 1999, 16-30.
巩稼民. 密集波分复用石英光纤通信系统中的受激喇曼散射效应和受激布里渊散射效应[D]. 西安:西安交通大学, 1999, 16-30.
[17] GONG Jia-min, LI Kai, JIANG Jie-wei, *et al.* Study on cascaded fiber-based fiber Raman amplifier[J]. *Study on Optical Communications*, 2008, **34**(6): 43-45.
巩稼民,李凯,蒋杰伟,等. 基于级联光纤的喇曼光纤放大器的研究[J]. *光通信研究*, 2008, **34**(6): 43-45.