

SRS对基于FWM的光纤参量放大器增益性能的影响

巩稼民¹, 张丽红², 郝倩文², 张晨¹

(1. 西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 为了研究受激喇曼散射(SRS)对基于四波混频(FWM)的光纤参量放大器(FOPA)增益性能的影响, 本文采用四阶龙格库塔法求解SRS和FWM共同作用下的稳态非线性耦合波方程, 并针对泵浦间隔、泵浦功率、非线性系数、泵浦中心波长、零色散波长、色散斜率等因素分析SRS对基于FWM的FOPA增益性能的影响。研究表明, 当光纤非线性系数 $\gamma \leq 2.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 时, SRS使FOPA增益降低, 即SRS对信号放大起消极作用; 当 $\gamma > 2.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 时, SRS使FOPA增益谱更加平坦, 即SRS对信号放大起积极作用。

关键词: 光纤参量放大器; 光纤通信; 受激喇曼散射; 四波混频; 相位匹配

中图分类号: O437.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.009

Influence of SRS on gain performance of fiber-optic parametric amplifier based on FWM

GONG Jia-min¹, ZHANG Li-hong², HAO Qian-wen², ZHANG Chen¹

(1. School of Electronic 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)

Abstract: In order to study the influence of Stimulated Raman Scattering (SRS) on the gain performance of Fiber-Optic Parametric Amplifier (FOPA) based on Four-Wave Mixing (FWM), in this paper, the fourth-order Runge-Kutta method is used to solve the steady-state nonlinear coupled wave equation under the combined action of SRS and FWM. The influence of SRS on FOPA gain performance is analyzed in terms of pump interval, pump power, nonlinear coefficient, pump center wavelength, zero dispersion wavelength and dispersion slope. The research results show that when the fiber nonlinear coefficient $\gamma \leq 2.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, SRS will lower the gain of FOPA, that is, SRS has a negative effect on signal amplification; when $\gamma > 2.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, SRS makes the FOPA gain spectrum flatter, which means SRS plays an active role in signal amplification.

Keywords: fiber-optic parametric amplifier; optical fiber communication; stimulated Raman scattering; four-wave mixing; phase matching

1 引言

随着第五代移动通信(5G)技术的部署和商用, 数据流量极速增长, 光纤通信在无线通信中变得愈加重要^[1]。在5G之前的通信网中, 骨干网使用掺铒光

纤放大器(EDFA)、半导体光放大器(SOA)、拉曼光纤放大器(RFA)等传统光放大器就能满足传输需求, 但在5G出现后, 其提出的高速率、大带宽以及低时延等需求显然是传统的光传输方案不能满足的, 而光纤参

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61775180); 西安邮电大学研究生创新基金项目(CXJJLY2019061)资助。

作者简介: 巩稼民(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信方向。E-mail: gjm@xupt.edu.cn

通讯作者: 张丽红(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信方向。E-mail: 1693835543@qq.com

收稿日期: 2020-09-08; **修订日期:** 2020-10-11

量放大器(FOPA)恰好满足这些需求,因此 FOPA 逐渐成为 5G 系统放大技术的研究热点。

现已有较多关于 FOPA 的研究文献,如 2020 年,巩稼民等人基于光纤中的 SRS 效应和 FWM 效应(以下简称 SRS 和 FWM)研究了泵浦功率以及非线性系数对双泵浦 FOPA 增益性能的影响,但未分析泵浦间隔、零色散波长等多个因素^[2];2018 年, Othman N 等人研究了泵浦功率、泵浦间隔、泵浦中心波长与零色散波长的差值对双泵浦 FOPA 增益性能的影响,但研究中只考虑了 FWM 一种非线性效应^[3]。不同于已有文献,本文在光纤中同时考虑 SRS 与 FWM 两种非线性效应,利用四阶龙格库塔法求解稳态非线性耦合波方程,并分析 SRS 在泵浦间隔、泵浦功率、非线性系数、泵浦中心波长、零色散波长、色散斜率等因素下对 FOPA 增益性能的影响。

2 基本结构及理论基础

2.1 基本结构

为了研究 SRS 与 FWM 对信号光传输特性的影响,建立光纤参量放大器基本结构图,由图 1 可看出有两束光波频率分别为 ω_1 、 ω_2 的强泵浦光和一束光波频率为 ω_s 的弱信号光,分别经过偏振控制器(PC)将自身偏振状态调整为平行线偏振,以便获得最大增益。取弱信号光波长位于强泵浦光的拉曼增益谱带宽内,然后将强泵浦光和弱信号光同时耦合进一个高非线性光纤(HNLF)中,从而产生 SRS

和 FWM。当满足 FWM 相位匹配条件时,FWM 和 SRS 使得强泵浦光将自身部分光能量传递给弱信号光,对弱信号光进行参量放大,同时产生一束光波频率为 $\omega_i = \omega_1 + \omega_2 - \omega_s$ ($\omega_1 \neq \omega_2$) 的闲频光^[4-5]。由于泵浦光、闲频光对信号光的研究造成干扰,因此在高非线性光纤中插入光带通滤波器(OBPF)用来滤除闲频光、泵浦光,并提取出放大过的信号光,由光谱分析仪等仪器观测信号光功率的变化^[6-7]。

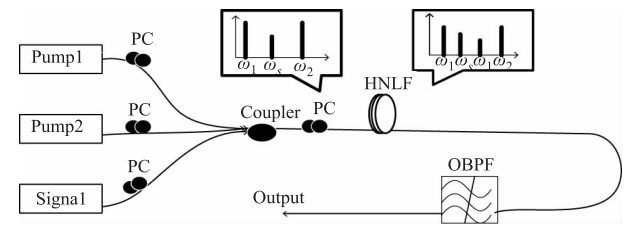


图 1 SRS 与 FWM 共同作用下光纤参量放大器基本结构图

Fig. 1 Basic structure diagram of optical fiber parametric amplification system under the joint action of SRS and FWM

2.2 理论基础

为了便于研究 SRS 对基于 FWM 的 FOPA 增益性能的影响,在此忽略自相位调制和交叉相位调制等非线性效应,利用非线性波动方程(1)得出 FWM 和 SRS 共同作用下的稳态非线性耦合波方程如下式(2)~(5)^[8-9]:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{dA_1}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_1 + 2i\gamma\left\{1 - f + \frac{f}{2}[H(\omega_s - \omega_2) + H(\omega_i - \omega_2)]\right\} \cdot A_2^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z) \quad (2)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_2 + 2i\gamma\left\{1 - f + \frac{f}{2}[H(\omega_s - \omega_1) + H(\omega_i - \omega_1)]\right\} \cdot A_1^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z) \quad (3)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_s + 2i\gamma\left\{1 - f + \frac{f}{2}[H(\omega_1 - \omega_i) + H(\omega_2 - \omega_i)]\right\} \cdot A_i^* A_1 A_2 \exp(-i\Delta\beta z) \quad (4)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_i + 2i\gamma\left\{1 - f + \frac{f}{2}[H(\omega_1 - \omega_s) + H(\omega_2 - \omega_s)]\right\} \cdot A_s^* A_1 A_2 \exp(-i\Delta\beta z) \quad (5)$$

式(1)等号右面为光纤的变化量(线性+非线性)。其中, E 是光波相互作用的电场强度; c 是真空光速 (3×10^8 m/s); μ_0 是真空磁导率; P_L 和 P_{NL} 分别是介质中的线性感应极化强度和非线性感应极化强度。

式(2)~(5)中, A_j ($j = 1, 2, s, i$) 是泵浦光 1、泵浦光 2、信号光和闲频光的振幅; γ 是非线性系数; α 为光纤损耗系数; $\Delta\beta$ 是线性相位失配量(当

$\omega_1 \neq \omega_2$ 时, $\Delta\beta = \beta_s + \beta_i - \beta_1 - \beta_2$, β_j ($j = 1, 2, s, i$) 分别是泵浦光 1、泵浦光 2、信号光和闲频光的光波传输常数; f 为拉曼系数(取 0.18); $H(\omega)$ 表示拉曼响应函数。

P_j ($j = 1, 2, s, i$) 是泵浦光 1、泵浦光 2、信号光和闲频光功率; $dD/d\lambda$ 是色散斜率; λ_j ($j = 1, 2, s, 0$) 分别为泵浦光 1、泵浦光 2、信号光和零色散点波长, ϕ_j ($j = 1, 2, s, i$) 是泵浦光 1、泵浦

光2、信号光和闲频光的相位; θ 为相对相位差,当 $\theta > 0$ 时,泵浦光功率流向信号光和闲频光功率,实现参量放大;当 $\theta < 0$ 时,信号光和闲频光功率流向泵浦光功率,实现参量衰减;当 $\theta = 0$ 时,信号光和闲频光功率最大,FOPA进入增益饱和区域^[10]。本文中 $\theta = \pi/2$,既满足能量守恒原则和相位匹配条件,同时实现FOPA的参量放大,使得泵浦光功率能最大效率的流向信号光和闲频光功率。其中:

$$P_j(z) = A_j(z) \cdot A_j^*(z) = |A_j(z)|^2 \quad j = [1, 2, s, i] \quad (6)$$

$$A_j(z) = \sqrt{P_j(z)} e^{i\phi_j(z)} \quad j = [1, 2, s, i] \quad (7)$$

$$\theta(z) = \Delta\beta z + \phi_s(z) + \phi_i(z) - \phi_1(z) - \phi_2(z) \quad (8)$$

$$\Delta\beta = \beta_s + \beta_i - \beta_1 - \beta_2 = \frac{c\pi\lambda_0^3}{(\lambda_1\lambda_2\lambda_s)^2} \frac{dD}{d\lambda} \cdot [\lambda_0(\lambda_1 + \lambda_2) - 2\lambda_1\lambda_2](\lambda_s - \lambda_1)(\lambda_s - \lambda_2) \quad (9)$$

3 仿真结果和分析

仿真选取泵浦功率、信号功率、闲频功率分别为 $p_1 = p_2 = 0.3 \text{ W}$ 、 $p_s = 0.01 \text{ mW}$ 、 $p_i = 0$;零色散波长、信号波长、泵浦波长、中心泵浦波长分别为 $\lambda_0 = 1555.8 \text{ nm}$ 、 $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1570 \text{ nm}$ 、 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$;根据相位匹配条件算得闲频光波长 $\lambda_i = 1549.5 \text{ nm}$;色散斜率 $dD/d\lambda = 0.031 \text{ ps} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$;光纤损耗系数 $\alpha = 0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$;非线性系数 $\gamma = 2.4 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 作为参考组参数。

利用四阶龙格库塔法对方程式(2)~(5)进行数值求解,采用控制变量法,保持参考组其他参数不变,只改变泵浦间隔,研究SRS对基于FWM的FOPA增益性能的影响,如图2所示。

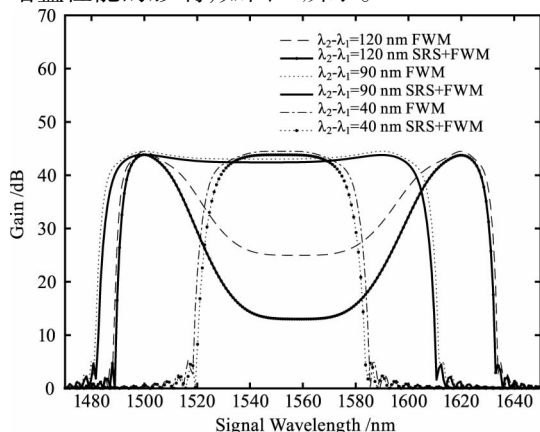


图2 不同泵浦间隔情况下,SRS对FOPA增益谱的影响
Fig.2 Effect of SRS on FOPA gain spectrum
with different pump intervals

图中,当泵浦波长 $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1570 \text{ nm}$,泵浦间隔为40 nm时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为43.83 dB, $B_{\text{SRS+FWM}}$ 为60 nm, G_{FWM} 为44.49 dB, B_{FWM} 带宽为64 nm,($G_{\text{SRS+FWM}}$ 、 $B_{\text{SRS+FWM}}$ 分别为SRS与FWM共同作用时的FOPA增益、带宽; G_{FWM} 、 B_{FWM} 分别为FWM单独作用时的FOPA增益、带宽)此时有无SRS都不影响其增益平坦度;当泵浦波长 $\lambda_1 = 1500 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1590 \text{ nm}$,泵浦间隔为90 nm时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为42.41 dB, $B_{\text{SRS+FWM}}$ 为126 nm, G_{FWM} 为43.03 dB, B_{FWM} 为128 nm,其增益平坦度比泵浦间隔为40 nm时的增益平坦度差,但仍未出现凹陷;当泵浦波长 $\lambda_1 = 1500 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1620 \text{ nm}$,泵浦间隔为120 nm时,相较于40 nm和90 nm,FOPA的增益平坦度受到SRS的影响较明显,SRS与FWM共同作用的泵浦中心波长增益比FWM单独作用的泵浦中心波长增益低12.12 dB,带宽窄3 nm。

由图2可知,无论间隔是40 nm、90 nm还是120 nm,FWM单独作用的FOPA带宽更宽,增益更高;泵浦间隔越大,带宽越宽,但FOPA的增益平坦度越差。由此可知,泵浦间隔主要影响的是FOPA的增益平坦度,对于泵浦间隔较窄($\lambda_2 - \lambda_1 \leq 90 \text{ nm}$)的双泵浦FOPA,拉曼增益谱往往在其信号增益谱外,可以忽略SRS对FOPA增益平坦度的影响,而泵浦间隔较宽($\lambda_2 - \lambda_1 > 90 \text{ nm}$)的双泵浦FOPA,拉曼增益谱会有一部分与信号增益谱重叠,此时SRS对FOPA增益平坦度的影响不能被忽略。

图3(a)中,SRS和FWM共同作用时,当 $p_1 = p_2 = 0.30 \text{ W}$ 时,增益谱平坦且增益为43.83 dB,当 $p_1 = p_2 = 0.36 \text{ W}$ 或 $p_1 = p_2 = 0.42 \text{ W}$ 时,FOPA增益谱均出现凹陷。由仿真可知, $p_1 = p_2 \leq 0.35 \text{ W}$ 时,泵浦功率越高,增益越高,带宽越宽;但泵浦功率过高($p_1 = p_2 > 0.35 \text{ W}$),可能会产生其他非线性效应,例如超过受激布里渊散射(SBS)的阈值,就会产生SBS效应,从而失去FOPA的增益平坦度。

图3(b)中,当两个泵浦功率 p_1 、 p_2 相等,均为0.21 W、0.31 W或0.41 W时,分别研究SRS与FWM共同作用时和FWM单独作用时的FOPA增益特性。当 $p_1 = p_2 = 0.21 \text{ W}$ 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为33.36 dB, G_{FWM} 为36.67 dB;当 $p_1 = p_2 = 0.31 \text{ W}$ 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为44.26 dB,FWM单独作用的FOPA增益谱不平坦;当 $p_1 = p_2 = 0.41 \text{ W}$ 时,两种FOPA增益

谱均不平坦,但考虑到 SRS 的 FOPA 增益平坦度更好。由仿真可知,在 FWM 单独作用的情况下, $p_1 = p_2 \leq 0.30$ W 时,增加泵浦功率, FOPA 增益持续增加; $p_1 = p_2 > 0.30$ W 时, FOPA 逐渐进入饱和和吸收状态,继续增加泵浦功率, FOPA 的增益平坦度将会恶化。考虑 SRS 可以把 FOPA 增益的饱和值提高到 0.35 W,但当 $p_1 = p_2 \leq 0.30$ W 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 小于 G_{FWM} 。

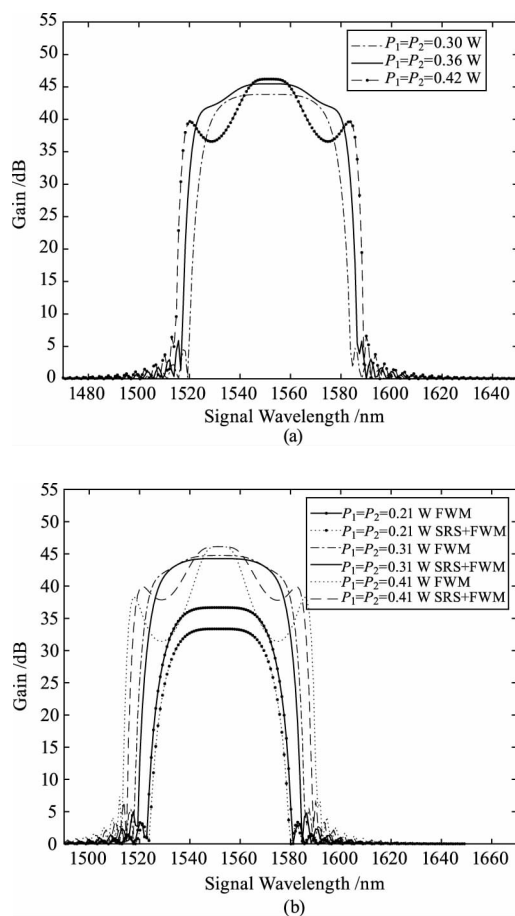


图3 在不同泵浦功率的情况下, SRS 对 FOPA 增益谱的影响

Fig. 3 Effect of SRS on FOPA gain spectrum with different pump powers

图4(a)中, SRS 和 FWM 共同作用时, 当 $\gamma = 2.4 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, 其增益为 43.83 dB; 当 $\gamma \geq 2.8 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, FOPA 增益谱出现凹陷。由仿真可知, 当 $\gamma < 2.8 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, 提高光纤非线性系数, 其增益增加, 带宽增宽, 耦合效率提高, 但一味提高光纤非线性系数不但不能获得高增益, 还会使 FOPA 的增益平坦度恶化。

图4(b)中, 当 γ 取 $2.0 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 或 $3.4 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, 分别研究 SRS 与 FWM 共同作用时以及 FWM 单独作用时的 FOPA 增益特性。当

$\gamma = 2.0 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为 39.78 dB, G_{FWM} 为 42.37 dB; 当 $\gamma = 2.5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 为 44.2 dB, FWM 单独作用的 FOPA 增益谱不平坦; 当 $\gamma = 3.4 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, 两种 FOPA 增益谱均不平坦, 但仍可看出 SRS 与 FWM 共同作用时的 FOPA 增益平坦度比 FWM 单独作用时的 FOPA 增益平坦度好。仿真结果表明 $\gamma \leq 2.5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, SRS 使 FOPA 的增益降低, 即 SRS 对信号放大起消极作用;

$\gamma > 2.5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, SRS 使 FOPA 增益谱更加平坦, 即 SRS 对信号放大起积极作用。

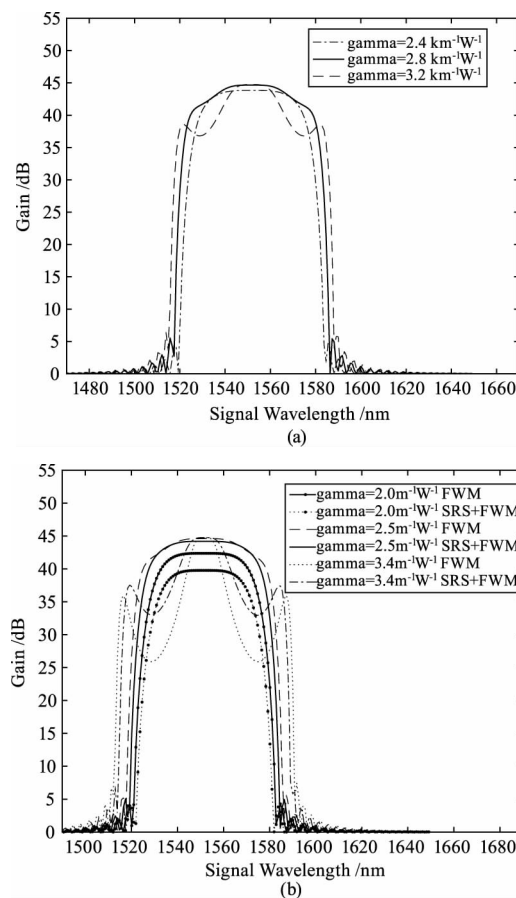


图4 不同光纤非线性系数情况下, SRS 对 FOPA 增益谱的影响

Fig. 4 Effect of SRS on FOPA gain spectrum with different fiber nonlinear coefficients

图5中, 当泵浦波长取 $\lambda_1 = 1513 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1553 \text{ nm}$, $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1570 \text{ nm}$, $\lambda_1 = 1547 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1587 \text{ nm}$, 且泵浦波长 λ_2 与 λ_1 之间的泵浦间隔相同(均为 40 nm)时, 分别研究 SRS 与 FWM 共同作用时和 FWM 单独作用时的 FOPA 增益特性。当泵浦中心波长 λ_c 分别取 1533 nm、1550 nm、1567 nm 时, $G_{\text{SRS+FWM}}$ 分别为 43.84 dB、43.83 dB、43.81 dB, $B_{\text{SRS+FWM}}$ 分别为 59 nm、60 nm、62 nm; G_{FWM} 均为

44.49 dB, B_{FWM} 分别为 63 nm、64 nm、64 nm; 由图 5 可知, 在 SRS 与 FWM 共同作用时, 如果几组数据中的泵浦间隔一致, 随着泵浦中心波长增加, FOPA 增益将减小, 带宽将增加, 增益谱向信号波长增长方向偏移; 且在同一个泵浦中心波长中, SRS 对 FOPA 增益和带宽影响很小。

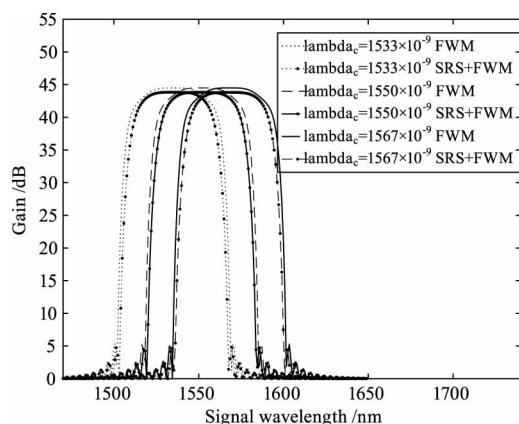


图 5 在泵浦中心波长不同的情况下, SRS 对 FOPA 增益谱的影响

Fig. 5 Effect of SRS on FOPA gain spectrum with different pump center wavelengths

图 6(a) 中, 当零色散波动值 $\delta = 0.2$, 零色散波长为 1555.6 nm、1555.8 nm 或 1556.0 nm 时, 分别研究 SRS 与 FWM 共同作用时和 FWM 单独作用时的 FOPA 增益特性。由图 6(a) 可知:

$$\begin{aligned} B_{\lambda_0=1555.6 \text{ nm (FWM)}} &> B_{\lambda_0=1555.8 \text{ nm (FWM)}} > \\ B_{\lambda_0=1556.0 \text{ nm (FWM)}} &> B_{\lambda_0=1555.6 \text{ nm (SRS+FWM)}} > \\ B_{\lambda_0=1555.8 \text{ nm (SRS+FWM)}} &> B_{\lambda_0=1556.0 \text{ nm (SRS+FWM)}} \end{aligned}$$

$G_{\text{SRS+FWM}}$ 均为 43.83 dB, G_{FWM} 均为 44.49 dB, 整体看来, 零色散波动值较小 ($\delta \leq 0.2$) 时, 不同零色散波长对应的图形几乎重叠。

图 6(b) 中, 零色散波动值 $\delta = 1.6$, 当零色散波长为 1554.2 nm、1555.8 nm 或 1557.4 nm 时, 无论是否考虑 SRS 作用, 在 $\delta = 1.6$ 和 $\delta = 0.2$ 时的 FOPA 增益均相同。且:

$$\begin{aligned} B_{\lambda_0=1554.2 \text{ nm (FWM)}} &> B_{\lambda_0=1554.2 \text{ nm (SRS+FWM)}} > \\ B_{\lambda_0=1555.8 \text{ nm (FWM)}} &> B_{\lambda_0=1555.8 \text{ nm (SRS+FWM)}} > \\ B_{\lambda_0=1557.4 \text{ nm (FWM)}} &> B_{\lambda_0=1557.4 \text{ nm (SRS+FWM)}} \end{aligned}$$

由仿真可知, 零色散波长只影响 FOPA 的带宽; 当零色散波动值 δ 较大 ($\delta > 0.2$) 时, 零色散波长对 FOPA 带宽影响较大, 不同零色散波长对应的图形区分较为明显。图 6(a)、(b) 都有一个相同的规律: 零色散波长越靠近泵浦中心波长 (零色散波长

与泵浦中心波长的差值越小), 带宽越宽; 反之, 零色散波长越偏离泵浦中心波长, 带宽越窄; 且在同一个零色散波长中考虑 SRS 会使 FOPA 增益降低和使 FOPA 带宽减小。

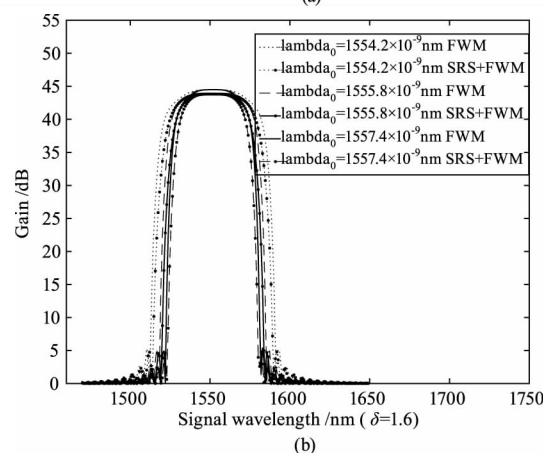
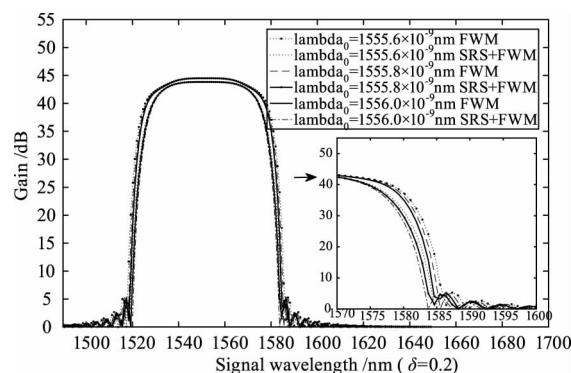


图 6 零色散波动值 $\delta = 0.2$ 或 $\delta = 1.6$, SRS 对 FOPA 增益谱的影响

Fig. 6 Zero dispersion fluctuation value $\delta = 0.2$ or

$\delta = 1.6$, the influence of SRS on FOPA gain spectrum

由图 7 知, 当色散斜率为 $0.011 (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$ 、 $0.031 (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$ 或 $0.051 (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$ 时, 分别研究 SRS 与 FWM 共同作用时和 FWM 单独作用时的 FOPA 增益特性。由图 7 知:

$$\begin{aligned} B_{\text{dD/d}\lambda=0.011 \text{ ps/nm}^2/\text{km (FWM)}} &> \\ B_{\text{dD/d}\lambda=0.011 \text{ ps/nm}^2/\text{km (SRS+FWM)}} &> \\ B_{\text{dD/d}\lambda=0.031 \text{ ps/nm}^2/\text{km (FWM)}} &> \\ B_{\text{dD/d}\lambda=0.031 \text{ ps/nm}^2/\text{km (SRS+FWM)}} &> \\ B_{\text{dD/d}\lambda=0.051 \text{ ps/nm}^2/\text{km (FWM)}} &> \\ B_{\text{dD/d}\lambda=0.051 \text{ ps/nm}^2/\text{km (SRS+FWM)}} &> \end{aligned}$$

$G_{\text{SRS+FWM}}$ 均为 43.83 dB, G_{FWM} 均为 44.49 dB; 由此可知, 色散斜率只影响 FOPA 的带宽, 色散斜率越小, 带宽越宽, 增益不变。对于同一个色散斜率, SRS 与 FWM 共同作用的 FOPA 带宽更宽, 增益更高。

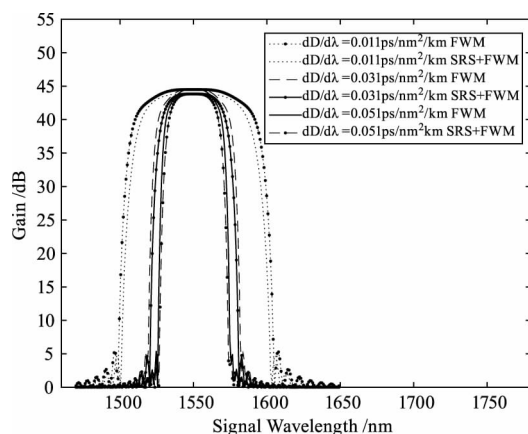


图 7 在色散斜率不同的情况下, SRS 对 FOPA 增益谱的影响

Fig. 7 Effect of SRS on FOPA gain spectrum
with different dispersion slope

4 结 论

本文从 FOPA 增益性能的角度出发, 建立光纤参量放大器基本结构图, 采用四阶龙格库塔法求解稳态非线性耦合波方程, 并在泵浦间隔、泵浦功率、光纤非线性系数、泵浦中心波长、零色散波长和色散斜率等因素下分析 SRS 对基于 FWM 的 FOPA 增益性能的影响。在信号光的参量放大过程中, SRS 在不同参数下会对 FOPA 的增益性能起不同作用, 仿真结果表明: 当泵浦功率 $p_1 = p_2 \leq 0.30 \text{ W}$ 和非线性系数 $\gamma \leq 2.5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 时, SRS 对信号放大起消极作用, 反之, SRS 对信号放大起积极作用; 当泵浦间隔 $\lambda_2 - \lambda_1 > 90 \text{ nm}$ 时, SRS 会使 FOPA 增益平坦度恶化; 在考虑泵浦中心波长、零色散波长以及色散斜率等因素时, 引入 SRS 会使 FOPA 增益降低; 由以上结论得出, 在不同参数的设置下, SRS 对基于 FWM 的 FOPA 增益性能的影响有利有弊, 在实际应用中, 应利用其优势优化光通信系统的性能。

参考文献:

- [1] Kumar A, Gupta M. A review on activities of fifth generation mobile communication system[J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, 57, 1125 – 1135.
 - [2] Gong Jiamin, Tian Ning, You Xiaolei, et al. The influence of SRS on FWM-based parametric amplifier in 5G system[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(2): 211 – 214. (in Chinese)
 - [3] Othman N, Mohd Shah N S, Tay K G, et al. The effect of pump parameters on dual-pump fiber optical parametric amplifier[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 150: 01010.
 - [4] Han Yaqiao. Research on a reverse biased PIN silicon waveguide parametric amplifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications 2020: 10 – 14. (in Chinese)
 - [5] Kaur G. Performance investigation of Raman-parametric hybrid amplifier for broadband amplification in L-band[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(14).
 - [6] Cao N, Zhu H, Li P, et al. Flat and ultra-broadband two-pump fiber optical parametric amplifiers based on photonic crystal fibers[J]. Optical Review, 2018, 3: 316 – 322.
 - [7] Pakarzadeh H, Golabi R, Peucheret C. Two-pump fiber optical parametric amplifiers: beyond the 6-wave model[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 223 – 230.
 - [8] Peng Wang, Liang Chen, Xiu Zhang, et al. Correction to: Investigation on four-wave mixing toward mid-infrared waveband in tellurite photonic crystal fiber[J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 3: 1 – 2.
 - [9] Zhao Linlin, Wang Gaoliang. The influence of zero-dispersion wavelength jitter on the gain spectrum of broadband dual-pumped fiber parametric amplifier[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2019, 36(2): 46 – 49. (in Chinese)
 - [10] Meng Yan. Research on all-optical signal processing technology based on fiber parametric amplifier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- 孟岩. 基于光纤参量放大器的全光信号处理技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.