

四波混频效应全光波长转换系统性能的优化

宁帆¹ 孙凌宇^{1,2*} 席丽霞² 马永欣² 张晓光²

(¹北京邮电大学网络教育学院网络系统与网络文化北京市重点实验室, 北京 100876)
²北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 全光波长转换器在全光网络中的应用能够避免波分复用网络的波长信道使用冲突,改善网络传输效率,提高网络的灵活性和容量,目前已成为全光网络研究的热点。半导体光放大器是全光波长转换器的首选器件。基于半导体光放大器四波混频效应的全光波长转换技术在严格透明的全光网络中最有前途,但是它的转换效率低,输出光信噪比较小。用 OptiSystem 仿真搭建了基于半导体光放大器四波混频效应的 40 Gb/s 归零-差分相移键控码信号的全光波长转换器。为获得更高转换效率、光信噪比以及较低的功率代价,详细讨论了半导体光放大器注入电流、波长失谐、信号光与抽运光功率等参数值之间的关系,得到了该全光波长转换器的最优参数和最佳工作环境。

关键词 光通信;波长转换系统;四波混频;转换效率;信噪比;功率代价

中图分类号 O472+.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s205006

Optimization of All Optical Wavelength Conversion System Based on Four Wave Mixing

Ning Fan¹ Sun Lingyu^{1,2} Xi Lixia² Ma Yongxin² Zhang Xiaoguang²

¹Municipal Key Laboratory of Network System and Network Culture, School of Network Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
²State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract All-optical wavelength converter can avoid wavelength conflict in wavelength division multiplexing channels, thus improving the transmission efficiency and increasing the network flexibility and capacity in all-optical networks. All-optical wavelength converter has become the research hotspot in recent years. Semiconductor optical amplifier (SOA) is the preferred choice for all-optical wavelength converter device. In the scenario of strict transparent all-optical network transmission, the all-optical wavelength converter utilizing the four-wave mixing effect of SOA is considered of greatest research value. A 40 Gb/s return-to-zero differential phase shift keying (RZ-DPSK) all-optical wavelength converter simulation system is built up based on four-wave mixing effect of SOA by OptiSystem software. With the aim to obtain higher conversion efficiency, higher optical signal-to-noise ratio and lower power penalty, the best parameters and best working environment are presented based on the discussion of the relationship among the parameters including injection current to SOA, wavelength detuning, signal and pump power.

Key words optical communications; wavelength conversion system; four-wave mixing; conversion efficiency; signal-to-noise ratio; power penalty

OCIS codes 060.4510; 070.4340; 140.4480; 190.4380

1 引言

波长转换技术是全光网络中的关键技术之一。

半导体光放大器(SOA)具有很强的非线性作用,易于集成,且制造技术已经成熟,是全光波长转换器

收稿日期: 2012-09-25; 收到修改稿日期: 2012-11-05

基金项目: 国家 973 计划(2012CB315604)、国家自然科学基金(60702005)、国家 863 计划(2012AA011302)和高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)资助课题。

作者简介: 宁帆(1962—),女,博士,副教授,主要从事宽带通信网方面的研究。E-mail: 18911191166@163.com

*通信联系人。E-mail: slyssmlfdp@yahoo.com.cn

(AOWC)的首选器件。

基于 SOA 的全光型波长转换有 3 种:交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)^[2,3]和四波混频(FWM)^[1~4]。前两种方式属于光的非线性强度调制,仅能实现有限的透明(仅对码速透明),受载流子寿命的限制,其最高转换速率仅能达到 40 Gb/s。FWM 型全光波长转换是使 AOWC 透明化的一种方案,可以保持信息振幅和相位的完整,是当前唯一能实现严格比特率和调制格式透明的技术,同时理论上具有高达 100 Gb/s 的转换潜力^[5],转换波长范围可以达到 80 nm^[6]。因此,基于 SOA 的 FWM 型全光波长转换在严格透明的全光网络中最有前途。

近几年来,人们对 SOA-FWM 型全光波长转换技术进行了广泛的研究,SOA-FWM 除转换效率低之外,由于放大自发辐射(ASE)噪声较大,它输出的光信噪比(OSNR)也较小。在改善其转换效率等方面有大量的报道^[7~10],但大多只研究信号光、抽运光功率对转换效率、OSNR 或功率代价中某一个因素的影响,讨论基于 SOA-FWM 效应 AOWC 的最佳工作环境,不能全面衡量系统的性能。本文根据 SOA 中 FWM 效应的基本原理,采用 OptiSystem 仿真平台,搭建了基于 SOA-FWM 效应的 40 Gb/s 归零-差分相移键控码(RZ-DPSK)信号的全光波长转换系统。从 SOA 注入电流、信号光和抽运光波长失谐、入射信号光功率、抽运光功率等多方面因素综合讨论,以获得更高转换效率、OSNR 以及较低的功率代价对应的参数值,得到基于 SOA-FWM 效应 AOWC 的最优参数设计和最佳工作环境。

2 仿真系统

2.1 SOA-FWM 原理

当中心波长分别为 λ_s 和 λ_p 的信号光和抽运光同时注入 SOA 时,SOA 中的载流子将随入射光强的分布形成载流子光栅。如果载流子的响应足够快,载流子光栅将是稳定的,否则其稳定性将会下降。SOA 中形成的载流子光栅主要由 3 种机制引起^[11]:载流子密度调制带间非线性作用,载流子加热,光谱烧孔带内高速非线性作用^[12]。SOA-FWM 是这 3 方面共同作用的结果。由于载流子光栅的作用,抽运光被光栅散射后产生波长为 $\lambda_c = 2\lambda_p - \lambda_s$ 的转换光,信号光被光栅散射后产生波长为 $\lambda_i = 2\lambda_s - \lambda_p$ 的卫星光。如图 1 所示,当转换光强度大于卫星光强度时,可作为波长转换的输出。这样就将原来携带在波长为 λ_s 载波上的信号转换到了波长为 λ_c

的转换光上。最后经过中心波长在 λ_c 的滤波器后即可得到转换光频谱。

这里采用转换光的转换效率、OSNR 和功率代价三项指标对这种基于 SOA-FWM 的波长转换器的转换性能进行衡量和评价。其中波长转换器的转换效率 η (dB)定义为四波混频之后转换光功率与入射信号光功率比值的函数,即 $\eta = 10\lg\left(\frac{P_c}{P_s}\right)$ 。转换光信号的 OSNR(dB)定义为转换光信号中的信号成分功率 P_{signal} 与噪声成分功率 P_{noise} 比值的函数,即 $R_{\text{OSNR}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}\right)$ 。某待测系统的功率代价定义为与背靠背传输的系统相比,该通信系统使接收机的误码率为 10^{-9} 时,接收机接收到信号光功率与背靠背传输时功率的差值。一般从系统接收到的信号光功率与误码率(BER)曲线能够测出功率代价的值,主要的影响因素有 SOA 的注入电流、入射信号光与抽运光的波长失谐和入射信号光与抽运光的功率。下面通过仿真平台逐一进行讨论。

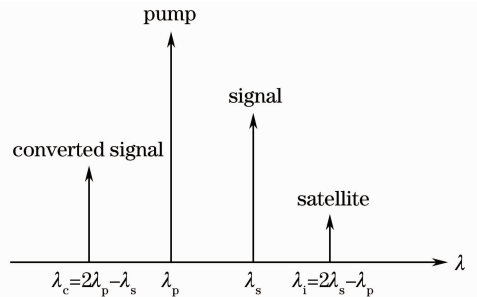


图 1 四波混频的频谱图

Fig. 1 Spectrum diagram for four-wave mixing

2.2 仿真系统

采用 OptiSystem 软件搭建了基于 SOA-FWM 波长转换的传输系统^[13],如图 2 所示。入射信号光为 40 Gb/s 的 RZ-DPSK 信号,由激光器输出的连续光(CW)经过马赫-曾德尔调制器(MZM1)调制产生非归零-差分相移键控码(NRZ-DPSK)信号后再经 MZM2 调制产生 40 Gb/s 的 RZ-DPSK 信号^[14,15]。抽运光由连续激光器 CW2 产生。两束光分别通过偏振控制器(PC),使偏振方向相同(信号光与抽运光偏振方向相同时,转换光的转换效率最高^[16])后耦合进入 3 dB 耦合器(OC),经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后注入 SOA 中进行 FWM。SOA 的插入损耗为 8 dB、噪声指数随注入电流的变化而变化。再通过滤波器(OTF)滤出转换光,调节滤波器使其中心波长为转换光波长,带宽为 0.35 nm。最后进入接收机解调出转换光信号。利

用 BER 分析仪记录其误码率,眼图分析仪观察其眼图,系统中频谱分析仪 (OSA) 可观察、分析其频谱^[17]。

为使研究内容对实际系统具有指导意义,搭建

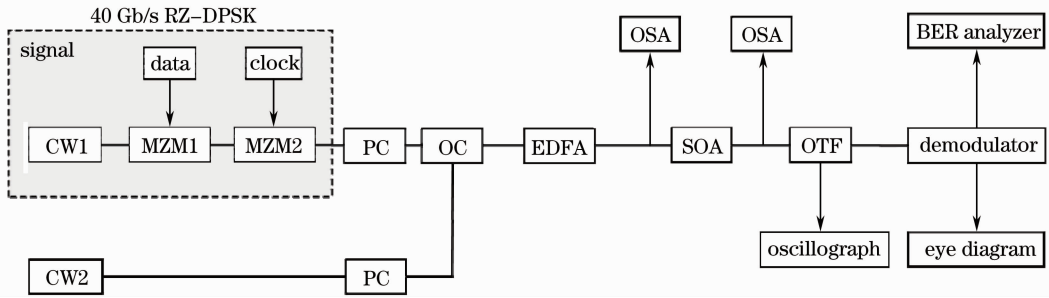


图 2 基于 SOA-FWM 的波长转换系统

Fig. 2 All optical wavelength conversion based on SOA-FWM

3 结果与讨论

3.1 转换效率

3.1.1 SOA 注入电流对转换效率的影响

对不同注入电流下该波长转换器的转换效率进行了仿真,如图 3 所示。设定信号光波长为 1550 nm,功率为 -10 dBm;抽运光波长为 1549 nm,功率为 -5 dBm;SOA 注入电流 I 取值范围是 0.10 ~ 0.34 A,间隔为 0.02 A。从图中可以明显看出,SOA 注入电流增大,转换效率也随之增大。理论上讲,SOA 注入电流增大会使 SOA 的增益变大,导致相同入射光功率下转换光功率增加,从而转换效率增大,仿真结果与理论分析一致。然而,对于实际系统中的 SOA,当注入电流过大时波长转换器会工作不稳定甚至会损坏 SOA,综合考虑仿真结果及商用 SOA 的实际情况,认为取 $I=0.3$ A 比较合适。因此在后面的仿真中,SOA 的注入电流均设为 0.3 A,此时其信号增益为 20 dB,噪声指数为 8 dB。

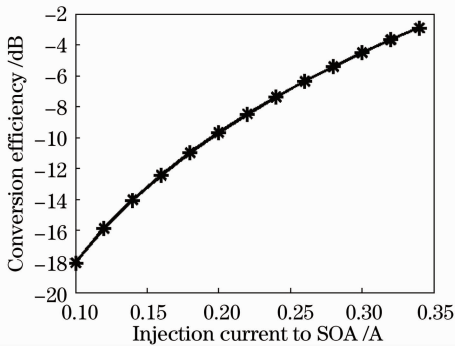


图 3 转换效率与 SOA 注入电流的关系

Fig. 3 Relationship between conversion efficiency and injection current to SOA

的 SOA-FWM 波长转换系统设置的环境及器件的相关参数均根据实际情况而定。下面通过理论和仿真来确定这种基于 SOA-FWM 效应的波长转换器的最优参数设计和最佳工作环境。

3.1.2 信号光与抽运光波长失谐对转换效率的影响

信号光与抽运光的波长差即波长失谐是影响 SOA 波长转换性能的重要因素。仿真了信号光与抽运光波长失谐与转换效率的关系,如图 4 所示。此处设定信号光功率为 -10 dBm,抽运光功率为 -5 dBm,SOA 的注入电流为 0.3 A,信号光波长为 1550 nm,抽运光波长取值范围为 1547 ~ 1553 nm,失谐范围为 -3 ~ 3 nm,间隔取 0.5 nm。从图中可以看出,信号光和抽运光的波长失谐量越大,四波混频的转换效率越低。此结果可以通过 SOA 中四波混频效应的机理来解释。SOA 中的四波混频效应主要是由两种效应、三种机制引起,其中两种效应为带间效应和带内效应。带间效应主要产生机理是载流子-空穴直接复合引起的 SOA 载流子浓度调制;带内效应主要产生机理是光谱烧孔效应和载流子加热效应引起的载流子在能带上占据概率的调制。信号光与抽运光的波长失谐导致带间效应逐渐减弱甚

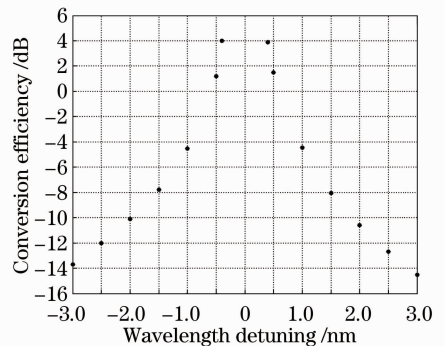


图 4 转换效率与信号光和抽运光波长失谐与转换效率的关系

Fig. 4 Relationship between conversion efficiency and wavelength detuning of signal light/pump light

至消失,因而波长转换效率迅速降低。然而当波长失谐过小时,由于信号光具有一定的频谱宽度,转换光与信号光的频谱会发生部分重叠,从而导致转换光与信号光不能完全分离,因此要在转换效率与系统的合理波长间隔之间做权衡。目前 40 Gb/s 密集波分复用系统信道间隔普遍采用 0.8 nm 或 0.4 nm,所以综合考虑仿真结果及实际情况,信号光与抽运光波长失谐取 0.4 nm 为最佳值。

3.1.3 信号光与抽运光功率对转换效率的影响

由于这种基于 SOA-FWM 的波长转换器的转换效率与入射信号光和抽运光功率密切相关,为了找出信号光和抽运光功率的最佳组合,图 5 绘制出了不同入射信号光和抽运光功率组合下转换效率的三维图和等高图。从图中可以看出入射信号光功率、抽运光功率与波长转换效率之间的关系。

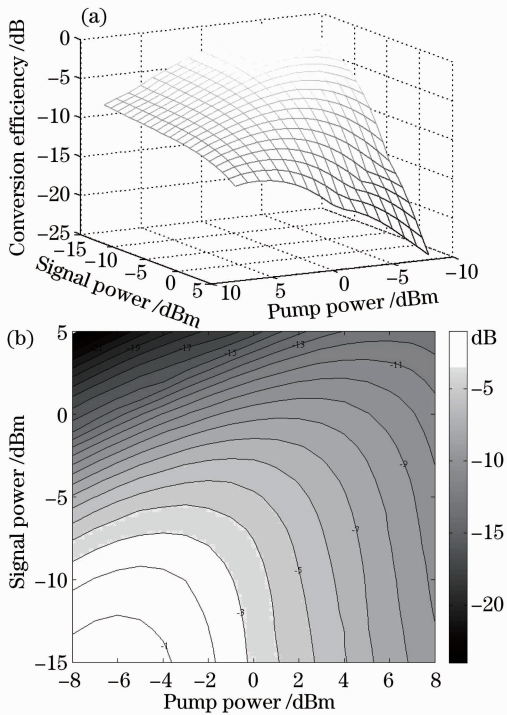


图 5 入射信号光、抽运光功率与转换效率的关系。

(a) 三维图; (b) 等高图

Fig. 5 Relationship between conversion efficiency and signal light/pump light power. (a) Three-dimensional diagram; (b) contour map

1) 入射抽运光功率与转换效率曲线存在极值。存在极值是由于随着抽运光功率增加,SOA 的三阶非线性效应增强,使得转换光功率增大,从而提高转换效率;另一方面当抽运光功率增加到一定值时,SOA 增益饱和后增益会下降,使输出的转换光功率减小,降低转换效率。

2) 当抽运光功率一定时,随着入射信号光功率增大,转换效率降低,转换效率与入射信号光功率成反比。虽然增大信号光功率会增强 SOA 的三阶非线性效应使转换光功率增大,但转换光功率的增大程度小于入射信号光功率的增大程度,从而转换效率降低。所以,为了提高转换效率必须适当降低入射信号光功率。根据 SOA-FWM 原理,当入射信号光功率过小时,影响 SOA 中载流子光栅的形成,从而难以产生 FWM 效应。所以考虑到 SOA-FWM 效应的工作情况,入射信号光功率最低取值 -15 dBm。

由仿真可知,当信号光功率为 -15 ~ -12 dBm,抽运光功率为 -8 ~ -4 dBm 时,转换光的转换效率相对较大。其中当信号光功率为 -15 dBm,抽运光功率为 -6 dBm 时,转换光的转换效率可达最大值 -0.4345 dB。

3.2 光信噪比

3.2.1 SOA 注入电流对转换光 OSNR 的影响

对不同注入电流下该波长转换器转换光的 OSNR 进行仿真,如图 6 所示。此处设定信号光波长为 1550 nm,功率为 -10 dBm;抽运光波长为 1549 nm,功率为 -5 dBm。SOA 注入电流取值范围是 0.10 ~ 0.34 A,间隔为 0.02 A。从图中可以明显看出,SOA 注入电流增大,转换光 OSNR 也随之增大。因而,SOA 的注入电流越大,该波长转换器的性能越好。从理论上讲,SOA 注入电流增大使 SOA 的增益变大,致使相同入射光功率下转换光功率增加,同时由于 XGM,高功率的信号光会对噪声有抑制作用,因而转换光的 OSNR 有所提升。仿真结果与理论分析一致。然而,对于实际系统中的 SOA,当注入电流过大时会工作不稳定甚至会损坏 SOA,综合考虑仿真结果及商用 SOA 的实际情况,认为取 $I = 0.3 \text{ A}$ 比较合适。

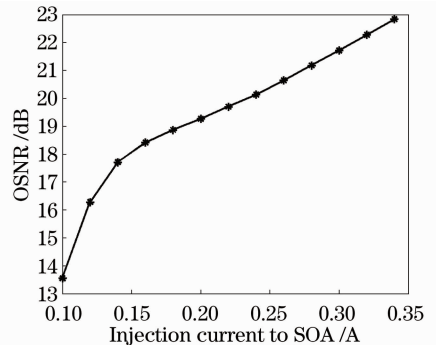


图 6 转换光 OSNR 与 SOA 注入电流的关系

Fig. 6 Relationship between OSNR of conversion light and injection current to SOA

3.2.2 信号光与抽运光波长失谐对转换光 OSNR 的影响

信号光与抽运光的波长差即波长失谐是影响转换光 OSNR 的重要因素。仿真了信号光与抽运光波长失谐与转换光 OSNR 的关系,如图 7 所示。此处设定信号光功率为 -10 dBm,抽运光功率为 -5 dBm,SOA 的注入电流为 0.3 A,从图中可以看出,信号光和抽运光的波长失谐越大,转换光的 OSNR 越低。此结果可以通过波长失谐对转换效率的影响解释:随着信号光和抽运光的波长失谐的增大,四波混频的转换效率降低。转换光功率迅速降低而噪声未受大的影响,因而由 OSNR 的定义可知,转换光的 OSNR 也迅速降低。然而当波长失谐过小时,由于信号光具有一定的频谱宽度,转换光与信号光的频谱会发生部分重叠,从而导致转换光与信号光不能完全分离,因此要在转换效率与系统的合理波长间隔之间做权衡。目前 40 Gb/s 密集波分复用系统信道间隔普遍采用 0.8 nm 或 0.4 nm。综合考虑仿真结果及实际情况,信号光与抽运光波长失谐取 0.4 nm 为最佳值。

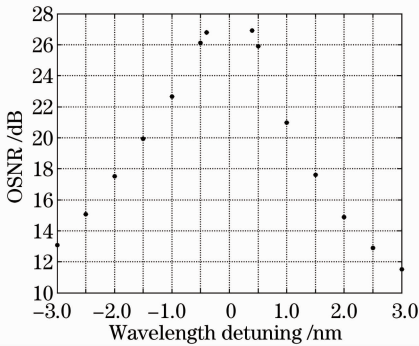


图 7 转换光 OSNR 与信号光与抽运光波长失谐的关系
Fig. 7 Relationship between OSNR of conversion light and wavelength detuning of signal light/pump light

3.2.3 信号光与抽运光功率对转换光 OSNR 的影响

由于基于 SOA-FWM 波长转换器的转换光 OSNR 与入射信号光和抽运光功率有关,为了找出信号光和抽运光功率的最佳组合值,图 8 中绘制出了不同入射信号光与抽运光功率组合下转换光 OSNR 的三维图和等高图。从图中可以看出入射信号光功率、抽运光功率与转换光 OSNR 之间的关系。

1) 输入信号光与抽运光均有一个使转换光 OSNR 饱和的值,如图 8(a)中显示,随着输入信号光功率的增加,转换光 OSNR 逐渐上升到极值后逐

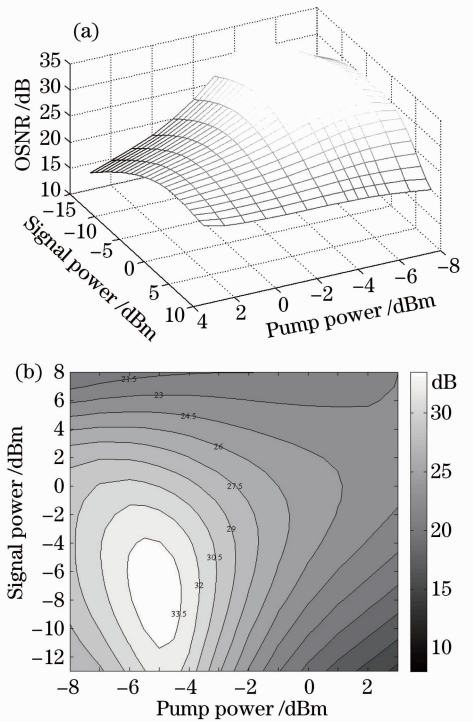


图 8 转换光 OSNR 与入射信号光功率、抽运光功率的关系。(a)三维图;(b)等高图

Fig. 8 Relationship between OSNR of conversion light and signal light/pump light power. (a) Three-dimensional diagram; (b) contour map

渐下降;同理,随着抽运光功率的提升,OSNR 曲线也是先升高后降低,存在一个饱和值点。在 SOA 未出现增益饱和时,注入 SOA 的光功率增大会使输出光信号的信号光增益大于噪声的增益,从而转换光的 OSNR 增大;而当 SOA 的增益饱和后,输入光功率增大会使信号光的增益下降而噪声的增益增大,从而使转换光的 OSNR 下降。

2) 信号光功率与抽运光功率的差值并非越大越好,而是当两者接近时转换光的 OSNR 较高。从图 8(a)和(b)容易看出,转换光 OSNR 值高的区域集中在信号光和抽运光功率接近的地方,有些地方当信号光功率和抽运光功率相同时转换光 OSNR 取极大值。

由仿真及理论分析可以得到使转换光 OSNR 最佳的信号光、抽运光功率组合。由仿真可知,当信号光功率为 $-12 \sim -4$ dBm,抽运光功率为 $-6 \sim -4$ dBm 时,转换光的 OSNR 相对较大。其中当信号光功率为 -7 dBm,抽运光功率为 -5 dBm 时,转换光的 OSNR 可达最大值 34.4267 dB。

3.3 功率代价

这里的波长变换器的入射信号光与抽运光功率

不仅影响系统的转换效率和转换光的 OSNR,同时还对该系统的功率代价产生影响。某种调制信号的使用对通信系统产生的功率代价能够很好地反映信号的性能和所需接收机的复杂程度,是对这种信号畸变和 OSNR 容忍度的折中考虑。信号的畸变是指入射 SOA 的信号由于增益恢复有一定的弛豫时间,使信号前端和后端的增益不同而引起信号的变形。采用 40 Gb/s RZ-DPSK 信号[DPSK 信号的功率代价小于开关键控(OOK)信号,即 DPSK 信号性能强于 OOK^[8]],由于 SOA 对信号引起畸变(信号眼图前倾),从而影响通信系统接收端的判决。接收机判决时刻偏离最佳判决时刻会增加系统的误码率。由于 SOA 的信号畸变比较严重,因而通过功率代价来找出最佳的入射信号光和抽运光功率是十分必要的。

图 9 为入射信号光功率分别为 -8、-9、-10、-11、-12 dBm 时功率代价与信号光和抽运光功率差值(SPR)的关系。从图中可知当入射信号光功率为定值时,转换光的功率代价随 SPR 增大先减小后增加,即存在最小值。且入射信号光功率越小,最小功率代价越小。综合不同信号光功率,当入射信号光功率为 -12 dBm、SPR 为 -9 dB 时,转换光的功率代价最小,为 0.1465 dB。

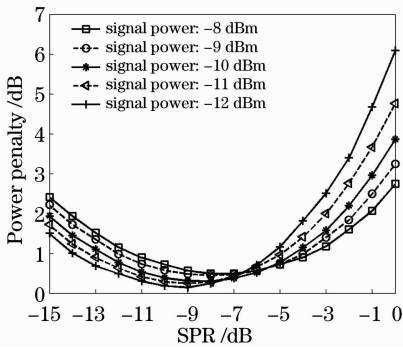


图 9 功率代价与 SPR 的关系

Fig. 9 Relationship between power penalty and SPR

4 结 论

通过理论分析及仿真结果讨论信号光和抽运光功率对此系统转换光的转换效率、OSNR 和系统功率代价的影响。综合考虑这 3 个方面,利用加权平均法计算最优解,当信号光与抽运光功率约为 -12 dBm 及 -5 dBm 时,该波长转换器有最佳的波长转换性能。

综上所述,这种基于 SOA-FWM 效应,传输 40 Gb/s RZ-DPSK 信号的波长转换器的最优工作

参数为:SOA 注入电流 0.3 A,信号光和抽运光波长失谐 0.4 nm,入射信号光功率 -12 dBm,抽运光功率 -5 dBm,此时接收到转换光的转换效率为 -1.0886 dB,OSNR 为 33.2315 dB,功率代价为 0.4089 dB。

参 考 文 献

- 1 A. Villafranca, I. Garces, M. Cabezon *et al.*. Multiple-bit all-optical logic based on cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier [C]. 2012 12th International Conference on Transparent Optical Networks, 2010
- 2 Y. Yu, B. Zou, W. Wu *et al.*. All-optical parallel NRZ-DPSK to RZ-DPSK format conversion at 40 Gb/s based on XPM effect in a single SOA[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(15): 14720~14725
- 3 Meng Xiaojun, Yan Lianshan, Pan Wei *et al.*. All-optical RZ to NRZ format conversion based on fiber cross-phase modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406005
- 4 孟小俊, 闫连山, 潘 炜 等. 基于光纤交叉相位调制的归零到非归零码转换[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406005
- 5 E. C. Magalhães, R. C. Figueiredo, N. S. Ribeiro *et al.*. System characterization of a SOA-FWM wavelength converter [C]. San Jose: Frontiers in Optics, Novel Sensors and Applications II, 2011. FThF2
- 6 S. R. Nuccio, O. F. Yilmaz, X. Wang *et al.*. Continuously tunable 1:16 μ s optical delay of 100 Gbit/s DQPSK and 50 Gbit/s DPSK signals using wavelength conversion and chromatic dispersion[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(11): 1819~1821
- 7 T. J. Morgan, R. S. Tucker, J. P. R. Lacey. All-optical wavelength translation over 80 nm at 2.5 Gb/s using four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 982~984
- 8 H. Jang, S. Hur, Y. Kim *et al.*. Theoretical investigation of optical wavelength conversion techniques for DPSK modulation formats using FWM in SOAs and frequency comb in 10 Gb/s transmission systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(9): 2638~2646
- 9 S. Gupta, N. Calabretta, G. Contestabile. Experimental characterization of SOA-based wavelength converters for DPSK signals[C]. Communications and Networking in China, 2006
- 10 L. Han, H. Hu, R. Ludwig. All-optical wavelength conversion of 80 Gb/s RZ-DQPSK using four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[C]. 21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008. 135~136
- 11 J. Dong, X. Zhang, F. Wang *et al.*. Single-to-dual channel NRZ-to-RZ format conversion by four-wave mixing in single semiconductor optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(12): 763~764
- 12 Chen Minghe, Gao Lin, Wang Hui *et al.*. Sheet metal forming limit stress diagram[J]. *The Chinese Mechanical Engineering*, 2005, **25**(17): 1593~1597
- 13 陈明和, 高 霖, 王 辉 等. 板料成形极限应力图及其应用研究发展[J]. *中国机械工程*, 2005, **25**(17): 1593~1597
- 14 Jin Wang. Pattern Effect Mitigation Techniques for All-Optical Wavelength Converters Based on Semiconductor Optical Amplifiers[M]. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010
- 15 Han Rui, Wu Baojian, Li Shubiao *et al.*. Experimental platform for magneto-optical four wave mixing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0705002
- 16 韩 瑞, 武保剑, 李述标 等. 磁光四波混频实验平台[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0705002
- 17 Yu Wenke, Lou Caiyun, Xing Yanfei *et al.*. Non-return-to-zero to return-to-zero format conversion for differential phase shift

- keying[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205002
- 余文科, 姜采云, 邢燕飞等. 差分相移键控的非归零到归零格式转换研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205002
- 15 Zhang Limei, Wang Zhi, Chen Yingchuan *et al.*. Simulation of 3-bit all optical comparator based on the cascade SOA-MZIs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105009
- 张丽梅, 王 智, 陈颖川等. 基于半导体光放大器马赫曾德尔干涉仪级联结构的全光 3 位比较器的仿真[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s105009
- 16 Dawei Wang. Performance comparison of using SOA and HNLF as FWM medium in a wavelength multicasting scheme with reduced polarization sensitivity [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(24): 3497~3505
- 17 Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*. 2×40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four-wave mixing in dispersion shifted fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806004
- 孟天晖, 于晋龙, 王 菊等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806004

栏目编辑: 王晓球