

三通道光相位混合运算器

曹亚敏^{**}, 武保剑^{*}, 万峰

电子科技大学信息与通信工程学院/光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 并行光逻辑运算器件是未来高速大容量全光信号处理的关键器件,也有助于降低信息的传输时延。利用光纤四波混频的非相敏放大(FWM-PIA)机理,设计三通道光相位混合运算器($A+B-C$, $A+C-B$, $B+C-A$)。通过建立并求解级联四波混频(FWM)的非线性耦合模方程组,揭示光相位运算器输出闲频光与输入信号光之间的固定相移关系,为相位补偿方法的实施提供理论依据。计算表明,该并行混合运算器的幅度噪声指数和误差矢量幅度(EVM)的相位噪声转移系数分别为 0.9 dB 和 1.67;当输入四相相移键控(QPSK)信号的信噪比大于 24 dB 和 EVM 小于 12%时,无纠错编码的符号错误率低于 10^{-3} 。比较三通道和单通道两种相位运算器的性能,由于相位运算器是通过 FWM 相位匹配关系执行混合运算功能的,它们有相同的相位噪声转移特性,但前者的噪声指数略低 0.2 dB,光功率转移效率高一倍以上。

关键词 光通信;光计算;四波混频;误差矢量幅度

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1206005

Hybrid Operators of Three-Channel Optical Phase

Cao Yamin^{**}, Wu Baojian^{*}, Wan Feng

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 611731, China

Abstract High-speed and large-capacity all-optical signal processing can be achieved in the future with the optical parallel logic operators. Such devices can help reduce data transmission delays. This study proposes a hybrid operator of three-channel optical phase for optical computing ($A+B-C$, $A+C-B$, and $B+C-A$) that is designed according to the phase-insensitive amplification principle of four-wave mixing (FWM) in fibers. The nonlinear coupled-mode equations for the cascade FWM are derived. Results reveal that between each output idler and input signal have a certain phase relation, which provides the theoretical basis for phase compensation. Moreover, parallel hybrid operators have amplitude noise index and phase noise transfer coefficient in terms of error vector amplitude (EVM) of 0.9 dB and 1.67, respectively. For a quadrature phase shift keying (QPSK) signal, when the signal-to-noise ratio is >24 dB and the EVM is $<12\%$, the symbol error rate of error-free coding is $<10^{-3}$. Three- and single-channel operators exhibit the same phase noise transfer characteristics due to common FWM-phase matching conditions. However, the three-channel operator exhibits lower phase noise of 0.2 dB and larger power transfer efficiency that is more than twice that of the single-channel operator.

Key words optical communications; optical computing; four-wave mixing; error vector magnitude

OCIS codes 060.4370; 060.4510; 070.4340

1 引 言

利用光域中超快逻辑运算可以实现高速传输下的数字信号处理功能,从而减少网络延迟,提高系统性能^[1]。光学非线性是实现高速光网络中诸多信号处理功能(如逻辑门、交换、复用/解复用和编码/解

码)的最佳选择^[2-8]。Bogoni 等^[1]在周期极化铌酸锂(PPLN)波导中,利用其二阶非线性效应,实现了 160 Gb/s 的二进制数据流的加减。为了提高波长信道的利用率,提升信道容量,高阶光调制信号开始越来越多地应用于现代光纤通信网络中^[9-10]。罗旋等^[9,11-18]研究了石墨烯的光学非线性

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-07-24; 录用日期: 2018-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61671108,61505021)

* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn; ** E-mail: 18745037964@163.com

效应,并基于四波混频(FWM)效应实现了四进制、八进制、十六进制数字的加减运算。本课题组也从理论上揭示了这种全光相位运算器的原理,给出了FWM过程的严格解析解,并用于分析3种加减混合运算过程(A+B-C,A-B+C和-A+B+C)中幅度噪声到相位噪声的转移特性^[19]。

一般而言,多个物理过程同时发生的优点是可以实现并行处理功能,但缺点是多个处理信道间可能会发生串扰,往往需要借助于更加复杂的理论加以分析。实际中高非线性光纤(HNLF)总有一定的FWM带宽,可能会导致级联FWM现象^[20]。若上述3种加减混合运算同时发生(这里不涉及串扰问题),则涉及多个FWM耦合过程,严格来讲不能再用单一的FWM耦合模方程进行描述。

本文研究3种相位运算过程(A+B-C,A-B+C和-A+B+C)同时发生时运算器的相位和幅度噪声转移特性。首先,给出三通道相位混合运算器结构,描述其工作过程;然后,在非简并FWM基础上建立6波(3个输入和3个输出)非线性耦合模方程组,并用数值计算方法证明输出闲频相位与混合运算结果之间总具有固定的相移关系;最后,分析三通道相位运算器的光功率转移效率、相位噪声和幅度噪声的转移特性,并与单一的FWM计算结果^[20]进行比较。研究表明:1)通过合理的波长选择和色散设计,可以并行实现3种混合运算功能,其光功率转化效率比单通道运算器高1倍以上;2)3种混合运算过程的性能基本一致,三通道四相相移键控(QPSK)相位运算器的相位噪声转移系数和幅度噪声指数分别为1.67[用误差矢量幅度(EVM, E_{VM})表示]和0.9 dB[用信

噪比(SNR, R_{SN})表示];3)相位运算器是通过FWM相位匹配关系执行混合运算功能的,三通道与单通道2种情形有相同的相位噪声转移特性,但三通道运算器的噪声指数略低0.2 dB,即只要光相位运算器输出光功率大于相位检测灵敏度,就可以用单一FWM的严格解析解很好地分析三通道相位运算器的噪声性能。

2 三通道混合运算器结构

利用HNLF中四波混频的非相敏放大器(FWM-PIA)的放大过程,可实现三通道相位混合运算器功能,其基本结构如图1所示。利用光相位调制器将数字基带信号A,B,C分别调制到波长为 λ_A, λ_B 和 λ_C 的3束光波上,所产生的QPSK等光相位调制信号输入到三通道混合运算器中。在混合运算器中,通过调节光纤延迟线(ODL),以保持3束信号光的相位同步;通过波分复用器(WDM)耦合到HNLF,非简并FWM效应使光纤输出端同时产生波长为 $\lambda_{I_1}, \lambda_{I_2}$ 和 λ_{I_3} 3束闲频光 I_1, I_2, I_3 ;通过解复用器(de-WDM)滤出3束闲频光,经相位补偿后输出相应的光信号,将混合运算结果体现在相位信息 $\theta_{I_1}, \theta_{I_2}, \theta_{I_3}$ 中。

混合运算器输出的光信号经相干检测后,当输入输出6束光的频率关系为 $\omega_{I_1} = \omega_A + \omega_B - \omega_C$, $\omega_{I_2} = \omega_A - \omega_B + \omega_C$ 和 $\omega_{I_3} = -\omega_A + \omega_B + \omega_C$ 时^[19],解调出的混合运算结果为 $I_1 = A + B - C, I_2 = A + C - B$ 和 $I_3 = B + C - A$,其中 $\omega_{I_1}, \omega_{I_2}, \omega_{I_3}$ 表示输出闲频光的角频率。下面将通过建立并求解6束光所满足的非线性耦合模方程组,揭示三通道运算器的工作机理,分析他们的光功率以及相位演化特性。

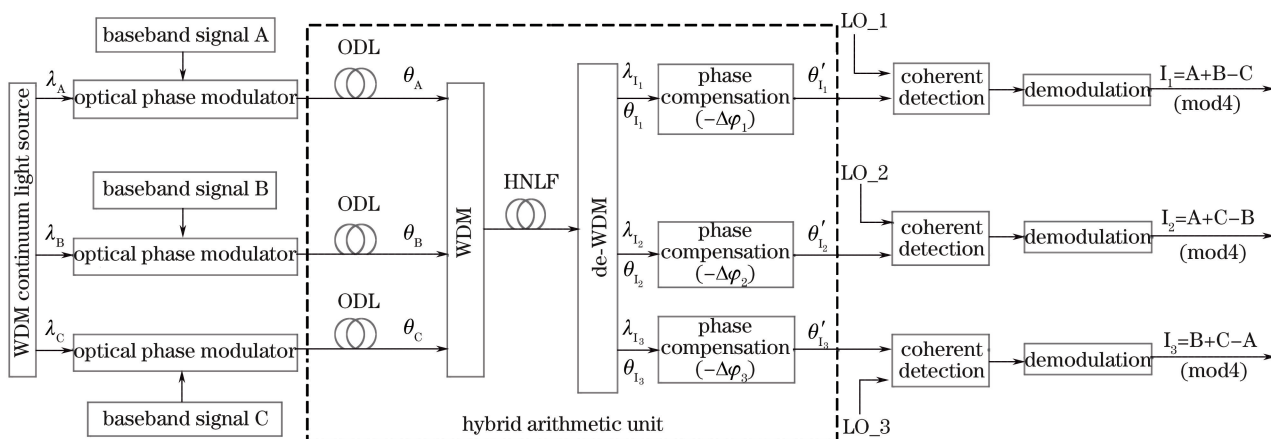


图 1 基于 HNLF 的 FWM-PIA 运算器结构

Fig. 1 Structure diagram of operator based on FWM-PIA in HNLF

3 三通道相位运算机理

光纤 FWM 起源于二氧化硅材料的三阶非线性效应,当相位匹配的条件满足时,3 个不同频率的输入导波光发生 FWM 作用,产生新的频率光信号,它们分别用下标 m, n, k, l 表示。为简单起见,忽略传输损耗,将自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 视为 FWM 的特殊情形,则他们的光场复包络 A_j ($j = m, n, k, l$) 满足如下非线性耦合模方程^[21]

$$\frac{\partial A_l}{\partial z} = i\gamma \sum_{m,n,k,l} \frac{D_{mn}}{D_p} A_m A_n A_k^* \times \exp[i(\Delta\beta_{mnkl}z - \Delta\omega_{mnkl}t)], \quad (1)$$

式中: z 表示非线性光纤长度; γ 为光纤非线性系数;导波光之间满足能量守恒关系,即 $\Delta\omega_{mnkl} = \omega_m + \omega_n - \omega_k - \omega_l = 0$, $\Delta\beta_{mnkl} = \beta_m + \beta_n - \beta_k - \beta_l$, 其中 $\omega_m, \omega_n, \omega_k, \omega_l$ 为对应光的角频率, $\beta_m, \beta_n, \beta_k, \beta_l$ 为对应光的传播常数; D_{mn} 为光波简并因子,当 $m = n$ 时, $D_{mn} = 1$, 对应于简并 FWM 过程, 否则, $D_{mn} = 2$, 对应于非简并 FWM 过程; D_p 为偏振相关因子, 相同偏振作用时 $D_p = 1$, 正交偏振时 $D_p = 3$ ^[22]。

适当设计光纤的色散,当 3 束闲频光同时满足准相位匹配条件时,3 种 FWM 过程将同时发生^[23]。假设光纤中光导波均为同偏振的线偏振光,考虑自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM) 以及级联 FWM 过程情形, (1) 式可化为如下非线性耦合模方程

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dA_A}{dz} &= i\gamma [|A_A|^2 A_A + 2A_A (|A_B|^2 + |A_C|^2 + |A_{I_1}|^2 + |A_{I_2}|^2 + |A_{I_3}|^2) + \\ &\quad 2A_{I_1} A_C A_B^* \exp(-i\Delta\beta_1 z) + 2A_{I_2} A_B A_C^* \exp(-i\Delta\beta_2 z) + 2A_B A_C A_{I_3}^* \exp(i\Delta\beta_3 z)] \\ \frac{dA_B}{dz} &= i\gamma [|A_B|^2 A_B + 2A_B (|A_A|^2 + |A_C|^2 + |A_{I_1}|^2 + |A_{I_2}|^2 + |A_{I_3}|^2) + \\ &\quad 2A_{I_1} A_C A_A^* \exp(-i\Delta\beta_1 z) + 2A_A A_C A_{I_2}^* \exp(-i\Delta\beta_2 z) + 2A_A A_{I_3} A_C^* \exp(i\Delta\beta_3 z)] \\ \frac{dA_C}{dz} &= i\gamma [|A_C|^2 A_C + 2A_C (|A_A|^2 + |A_B|^2 + |A_{I_1}|^2 + |A_{I_2}|^2 + |A_{I_3}|^2) + \\ &\quad 2A_A A_B A_{I_1}^* \exp(i\Delta\beta_1 z) + 2A_{I_2} A_B A_A^* \exp(-i\Delta\beta_2 z) + 2A_A A_{I_3} A_B^* \exp(-i\Delta\beta_3 z)] \\ \frac{dA_{I_1}}{dz} &= i\gamma [|A_{I_1}|^2 A_{I_1} + 2A_{I_1} (|A_A|^2 + |A_B|^2 + |A_C|^2 + |A_{I_2}|^2 + |A_{I_3}|^2) + 2A_A A_B A_C^* \exp(i\Delta\beta_1 z)] \\ \frac{dA_{I_2}}{dz} &= i\gamma [|A_{I_2}|^2 A_{I_2} + 2A_{I_2} (|A_A|^2 + |A_B|^2 + |A_C|^2 + |A_{I_1}|^2 + |A_{I_3}|^2) + 2A_A A_C A_B^* \exp(i\Delta\beta_2 z)] \\ \frac{dA_{I_3}}{dz} &= i\gamma [|A_{I_3}|^2 A_{I_3} + 2A_{I_3} (|A_A|^2 + |A_B|^2 + |A_C|^2 + |A_{I_1}|^2 + |A_{I_2}|^2) + 2A_B A_C A_A^* \exp(i\Delta\beta_3 z)] \end{aligned} \right. , \quad (2)$$

式中: A_j ($j = A, B, C, I_1, I_2, I_3$) 为输入和输出光场的复包络;相位失配因子分别为 $\Delta\beta_1 = \beta_A + \beta_B - \beta_C - \beta_{I_1}$, $\Delta\beta_2 = \beta_A + \beta_C - \beta_B - \beta_{I_2}$ 和 $\Delta\beta_3 = \beta_B + \beta_C - \beta_A - \beta_{I_3}$, 其中 β_j 表示对应光的传播常数 ($j = A, B, C, I_1, I_2, I_3$)。传播常数 $\beta(\omega_j)$ 可用泰勒级数在光纤零色散点 ω_0 处展开^[22], 即

$$\beta(\omega_j) = \beta(\omega_0) + \frac{1}{6} [\lambda_0 / (2\pi c)]^2 (\lambda_0^2 S + 2\lambda_0 D) (\omega_j - \omega_0)^3, \quad (3)$$

式中: λ_0 为参考波长;参数 D 和 S 表示光纤色散、色散斜率。

给定输入光场和光纤参数,可采用四阶龙格库塔法^[24]对(2)式进行求解。为了便于比较,光纤参数取自本实验室现有的高非线性光纤(光纤参数见表 1)。此外,为了与已有实验^[18]进行对比,3 束输入信号光波长分别为 $\lambda_A = 1552$ nm, $\lambda_B = 1550$ nm 和 $\lambda_C = 1546$ nm, 输入光功率为 $P_A = P_B = P_C = 100$ mW, 则 3 束输出闲频光波长分别为 $\lambda_{I_1} = 1556$ nm, $\lambda_{I_2} = 1547$ nm 和 $\lambda_{I_3} = 1544$ nm, 对应的相位失配因子分别为 $\Delta\beta_1 = 0.0012$ rad/m, $\Delta\beta_2 = -3.38 \times 10^{-4}$ rad/m 和 $\Delta\beta_3 = 4.5 \times 10^{-4}$ rad/m, 输出功率分别为 $P_{I_1} = 54.7$ mW, $P_{I_2} = 53.8$ mW 和 $P_{I_3} = 54.9$ mW。

表 1 所用的 HNLF 参数

Table 1 HNLF parameters used in this study

Length z /m	Dispersion at 1550 nm D /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	Dispersion slope at 1550 nm S /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$)	Nonlinear coefficient γ /($\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$)
510	0.06	0.006	10.8

以闲频光 1 为例,改变输入信号光相位,计算它们相位的混合运算($\theta_A + \theta_B - \theta_C$)和输出闲频相位 θ_{i_1} ,它们之间明显存在一个固定的相位差 $\Delta\varphi_1 = \theta_{i_1} - (\theta_A + \theta_B - \theta_C) = -1.796$ rad,如图 2 所示。正是这种固定相移关系的存在,才使得相位补偿后光波输出相位满足 $\theta'_{i_1} = \theta_A + \theta_B - \theta_C$,从而实现相位的混合运算过程。同样地,另外两束闲频光亦有如此关系,即 $\Delta\varphi_2 = \theta_{i_2} - (\theta_A + \theta_C - \theta_B) = -1.471$ rad 和 $\Delta\varphi_3 = \theta_{i_3} - (\theta_B + \theta_C - \theta_A) = -1.635$ rad。可见,输出闲频相位与混合运算结果之间的固定相移关系是相位混合运算器的工作基础。

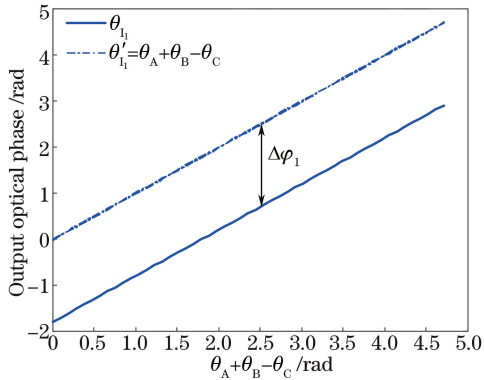


图 2 6 波耦合时输出闲频光 1 的相位随 $\theta_A + \theta_B - \theta_C$ 变化情况

Fig. 2 Idler $1'$ phase versus input signal phase $\theta_A + \theta_B - \theta_C$ for six-wave coupling

4 三通道相位运算器性能分析

计算三通道相位运算器的光功率转化效率,以 QPSK 多进制数字光信号为例分析相位和幅度噪声的转移特性,并与单通道相位运算器性能进行比较。

4.1 光功率转化效率

根据(2)式可计算 6 束导波光在 HNLF 中的功率演化曲线,随着光纤长度的增加,原来输入的 3 束导波光功率逐渐转移到 3 束闲频光上,转移到 3 束闲频光的功率大小略有差异。为了比较三通道运算器和单通道运算器的功率特性,定义运算器的光功率转化效率 η_p 为输出闲频光总功率 $P_{1,\text{out}}$ 与输入信号光总功率 $P_{s,\text{in}}$ 的比值。相位混合运算器作为一种非线性器件,其光功率转化效率 η_p 将随输入信号

光功率的增加而增加,如图 3 所示,其中光纤长度 $L = 510$ m。计算表明,当每个输入导波光的光功率均为 100 mW 时,三通道运算器输出的 3 个闲频光的平均功率约为 55 mW,而单通道运算器输出闲频光功率约为 70 mW^[19],前者的光功率转化效率比后者高 1 倍以上。

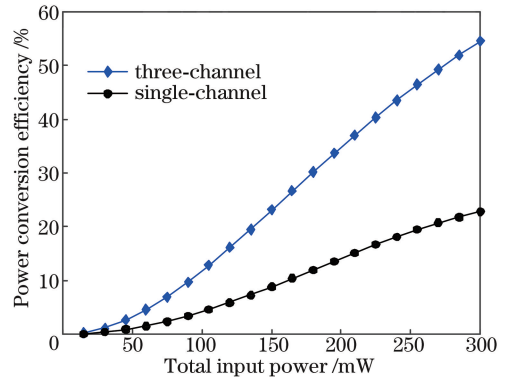


图 3 运算器功率转移效率随输入总功率的变化曲线

Fig. 3 Power conversion efficiency curve versus the total input power for the operator

4.2 相位噪声转移特性

运算器的相位噪声转移特性可通过输入输出光信号的 EVM 加以分析^[19],输出闲频光的 EVM 定义为误差矢量信号和参考信号的均方根(RMS)的比值^[25],其计算公式表示为

$$E_{\text{VM}} = \frac{\text{RMS}(|A_{\text{out}} - A_{s,\text{out}}|)}{\text{RMS}(|A_{s,\text{out}}|)} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: A_{out} 和 $A_{s,\text{out}}$ 分别为有、无输入噪声时输出闲频光的光场复包络,可由(2)式计算得到。

假设输入光信号的光场相位上叠加 1 个零均值的高斯白噪声,在相位混合运算过程中该相位噪声也将转移到输出闲频光的相位上,进而影响相干检测结果的可靠性。图 4 给出了输入相位噪声对 3 个输出闲频光信号性能的影响,3 种混合运算过程的性能基本一致。由图 4(a)可以看出,3 束闲频光的 EVM 值十分接近,并且输出闲频光的 EVM 值与输入导波光 EVM 成正比;图 4(b)给出了输出闲频光相位的符号错误率(R_{SE})^[19],它随着输入导波光 EVM 的增加而增大,当输入导波光的 EVM 小于 12% 时,可以保证混合运算器的 R_{SE} 不超过 10^{-3}

(无纠错编码), 对应的输出 EVM 约为 20%。图 4(a)中给出了输入 EVM 约为 12%时输入和输出 QPSK 信号的星座图, 可观察到相位噪声的转移特性。对单通道运算器进行类似分析可知, 其输入输出相位噪声转移特性与三通道运算器几乎相同。由图 4(a)可知, 相位运算器的 EVM 相位噪声转移系数为 1.67。

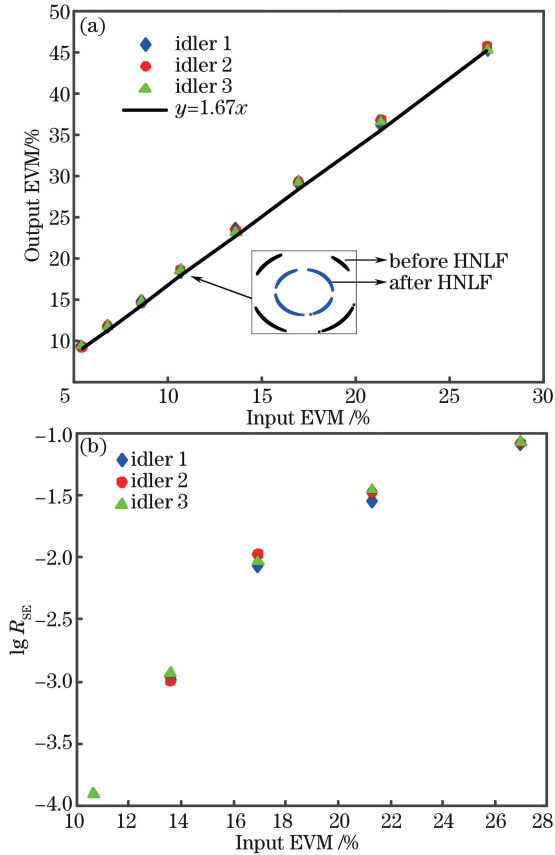


图 4 运算器相位噪声性能计算。(a)输出闲频光 EVM 随输入导波光 EVM 的变化; (b)输出闲频光符号错误率随输入导波光 EVM 的变化

Fig. 4 Calculated EVM, R_{SE} curves for the operator. (a) EVM curves for three output idlers versus the EVM of input signals; (b) R_{SE} curves for three output idlers versus the EVM of input signals

4.3 幅度噪声转移特性

运算器的幅度噪声转移特性除了可用 EVM 表示外, 还可以用 R_{SN} 参数进行评价。输出闲频光的 R_{SN} 可以表示为

$$R_{SN_out} = \frac{E[|A_{s,out}|^2]}{E[(|A_{out}| - |A_{s,out}|)^2]}, \quad (5)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示求平均。当输入导波光的光场幅度上叠加一个标准差为 σ 的零均值高斯白噪声时, 其输入 R_{SN} 可为 $R_{SN_out} = E[|A_{s,in}|^2]/\sigma^2$, $A_{s,in}$ 为输

入信号的光场复包络。

以闲频光 1 为例, 计算三通道和单通道 2 种混合运算器的幅度噪声转移曲线, 即输出 EVM 和 R_{SN} 随输入 R_{SN} 的变化, 如图 5 所示。由图 5(a)可知, 基于光纤的三通道混合运算器幅度噪声转移趋势与硅基实验情形^[18]大体一致, 但后者还需考虑双光子吸收非线性效应。图 5(b)表明, 三通道混合运算器的噪声指数约为 0.9 dB, 比单通道运算器噪声指数小 0.2 dB。计算表明, 若要满足无纠错编码的 R_{SE} 低于 10^{-3} , 输入信号光的信噪比应大于 24 dB。

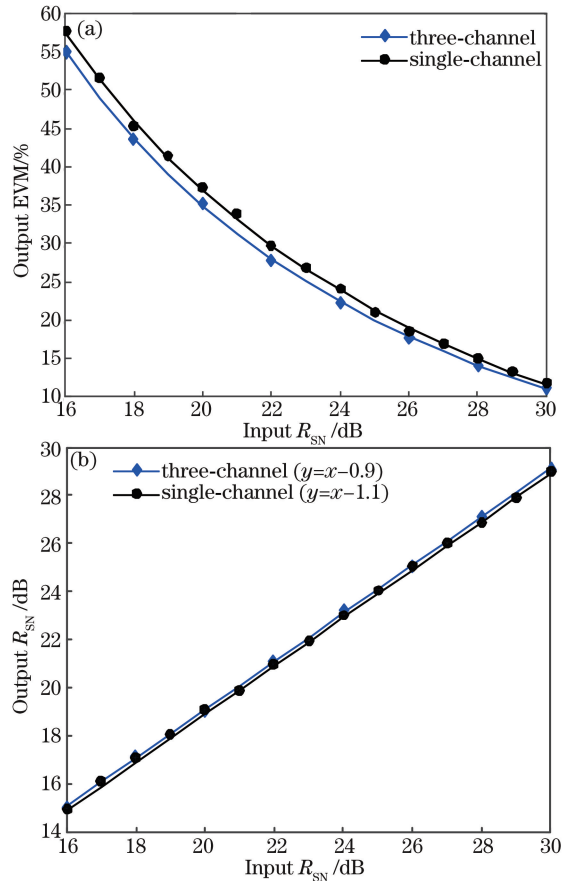


图 5 运算器幅度噪声性能对比。(a)三通道与单通道运算器输出闲频光 EVM 的对比曲线; (b)三通道与单通道运算器输出闲频光信噪比的对比曲线

Fig. 5 Calculated EVM, R_{SN} curves for two operators. (a) Idler EVM comparison between three- and single-channel operators; (b) comparison of idler R_{SN} between three- and single-channel operators

上述分析表明, 三通道混合运算器的 EVM 或 R_{SN} 性能稍好于单通道情形。总之, 只要光相位运算器输出光功率大于相位检测灵敏度, 就可以用 FWM 的严格解析解很好地分析多输入多输出相位运算器的噪声性能。

需指出的是, 与单通道情形相比, 多通道混合运

算器在理论和实验上都显得相对复杂。一方面,对每个通道而言,存在着功率转换效率和多波长传输的问题。幸运的是,多通道混合运算器是通过相位运算过程实现的,只要将输入和输出功率控制在适当范围就对器件性能的影响很小^[18]。另一方面,要进一步增加混合运算器的并行通道数,需进一步改善光纤的色散设计,优化 FWM 带宽和效率,同时,还要适当设置输入光信号波长,抑制信道串扰^[26]。

5 结 论

给出了三入三出 6 光束非简并 FWM 相位混合运算器的结构方案,通过建立并求解 6 光束级联 FWM 耦合模方程,数值分析了输出闲频光与输入信号光之间具有的固定相位关系,揭示了运算器能够实现 $A+B-C$, $A-B+C$ 和 $-A+B+C$ 3 种并行加减混合运算的本质。以 QPSK 信号为例,对三通道和单通道 2 种运算器的功率转换效率、相位噪声性能和幅度噪声性能进行对比分析,得出:通过合理的波长选择和色散设计,三通道运算器不仅实现了 3 路并行的加减混合运算,并且其功率转换效率比单通道运算器高 1 倍以上;三通道和单通道 2 种运算器具有同样的相位噪声转移特性,根据输出闲频光 EVM 与输入信号光 EVM 之间的正比关系,确定运算器的相位噪声转移系数为 1.67,当输入信号光的 EVM 小于 12% 时,可以保证混合运算器的 R_{SE} 不超过 10^{-3} (无纠错编码);三通道运算器的幅度噪声转移量略低于单通道运算器,若要满足无纠错编码的 R_{SE} 低于 10^{-3} ,输入信号光的信噪比应大于 24 dB。总之,只要光相位运算器输出光功率大于相位检测灵敏度,就可以用单一 FWM 的严格解析解很好地分析三通道相位运算器的噪声性能。

参 考 文 献

- [1] Bogoni A, Wu X, Fazal I, *et al.* All-optical 160 Gb/s half-addition half-subtraction and AND/OR function exploiting pump depletion and nonlinearities in a PPLN waveguide [C] // IEEE 34th European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2008, Brussels, Belgium. New York: IEEE, 2008: 1-2.
- [2] Cotter D, Manning R J, Blow K J, *et al.* Nonlinear optics for high-speed digital information processing [J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1523-1528.
- [3] Wang J, Yang J Y, Willner A. Constellation manipulation for optical multicasted hexadecimal coding/decoding of 10-Gbaud/s 16-QAM using non-

degenerate FWM in HNLFs [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles. Washington: Optical Society of America, 2012, OTh3H: OTh3H. 3.

- [4] Berrettini G, Simi A, Malacarne A, *et al.* Ultrafast integrable and reconfigurable XNOR, AND, NOR, and NOT photonic logic gate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(8): 917-919.
- [5] Li Z, Zhang M, Wang D S, *et al.* All-optical WDM multicast scheme for supporting emergency multicast communication in WDM optical access network based on FWM in SOA [C] // IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March, 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE, 2016: 1-3.
- [6] Kim J H, Jhon Y M, Byun Y T, *et al.* All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(10): 1436-1438.
- [7] Syed A, Chaitanya G V, Sayeh M R. All optical digital logic gates library [J]. *Journal of Optics*, 2012, 41(3): 142-147.
- [8] Luo X, Jiang Y, Yu J L, *et al.* Simultaneous optical signal dropping and cleaning by utilizing four-wave mixing effects based optical logic gate in optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2524-2528.
罗旋, 江阳, 于晋龙, 等. 基于光纤中四波混频效应光逻辑门的信号同步提取与擦除 [J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2524-2528.
- [9] Wang J, Huang H, Wang X, *et al.* Reconfigurable 2. 3-Tbit/s DQPSK simultaneous add/drop, data exchange and equalization using double-pass LCoS and bidirectional HNLF [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18246-18252.
- [10] Liu Y N, Mu D. Research of a new algorithm on high-speed quaternary optical computing [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(8): 57-59.
刘彦楠, 牧笛. 一种新型高速四进制光计算算法研究 [J]. *光通信技术*, 2014, 38(8): 57-59.
- [11] Wang A D, Hu X, Zhu L, *et al.* Experimental demonstration on two-input optical high-base hybrid doubling and subtraction functions in graphene [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31728-31735.
- [12] Wang J, Yang J Y, Huang H, *et al.* All-optical 50-Gbaud/s three-input hybrid addition/subtraction of quaternary base numbers using multiple non-degenerate FWM processes and 100-Gbit/s DQPSK signals [C] // European Conference and Exhibition on Optical Communications, September 16-20, 2012. Amsterdam Netherlands. Washington: Optical Society of America, 2012, Tu. 1. A: Tu. 1. A. 4.

- [13] Wang J, Yang J Y, Wu X X, *et al.* 40-Gbaud/s (120-Gbit/s) octal and 10-Gbaud/s (40-Gbit/s) hexadecimal simultaneous addition and subtraction using 8PSK/16PSK and highly nonlinear fiber [C] // 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2011: 1-3.
- [14] Gui C C, Wang J, Zhang Z L, *et al.* Silicon-organic hybrid slot waveguide based three-input multicasted 160-Gbit/s optical hexadecimal addition/subtraction using multi-FWM and m-ary PSK [C] // IEEE Photonics Conference, September 8-12, 2013, Bellevue, WA, USA. New York: IEEE, 2013: 378-379.
- [15] Hu X, Wang A D, Zeng M Q, *et al.* Graphene-assisted multiple-input high-base optical computing [C] // IEEE 15th International Conference on Optical Communications and Networks, September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2016: 1-3.
- [16] Wang J, Nuccio S R, Yang J Y, *et al.* High-speed addition/subtraction/complement/doubling of quaternary numbers using optical nonlinearities and DQPSK signals [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1139-1141.
- [17] Wang J, Yang J Y, Huang H, *et al.* Three-input optical addition and subtraction of quaternary base numbers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 488-499.
- [18] Gui C, Wang J. Silicon-organic hybrid slot waveguide based three-input multicasted optical hexadecimal addition/subtraction [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7491.
- [19] Cao Y M, Wu B J, Wan F, *et al.* Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(9): 094208.
曹亚敏, 武保剑, 万峰, 等. 四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究 [J]. *物理学报*, 2018, 67(9): 094208.
- [20] Wang L, Jing J T. Theoretical research on optimization of signal-noise ratio based on cascaded four-wave mixing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0719001.
王丽, 荆杰泰. 基于级联四波混频系统实现信噪比优化的理论研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0719001.
- [21] Zhou X Y, Wu B J, Wen F, *et al.* Investigation of crosstalk suppression techniques for multi-wavelength regeneration based on data-pump FWM [J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 1-6.
- [22] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics* [M]. Jia D F, Yu Z H, *et al.*, Transl. 2nd ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2010: 25-32, 274-282.
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 等, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 25-32, 274-282.
- [23] Li S B, Wu B J, Wen F, *et al.* Research on magnetic control mechanism of four-wave mixing in highly nonlinear fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024213.
李述标, 武保剑, 文峰, 等. 高非线性光纤中四波混频的磁控机理研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024213.
- [24] Qi Z C. *Numerical analysis and application* [M]. Changsha: University of National Defence Technology Press, 1996: 89-95.
齐治昌. 数值分析及其应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996: 89-95.
- [25] McKinley M D, Remley K A, Myslinski M, *et al.* EVM calculation for broadband modulated signals [C] // 64th ARFTG Conference Digest, Orlando, FL. [S. l. : s. n.], 2004: 45-52.
- [26] Zhou X Y, Wu B J, Wen F, *et al.* Total data rate of multi-wavelength 2R regenerators for time-interleaved RZ-OOK signals [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22937-22951.