

文章编号:1001-5078(2024)08-1329-08

· 光纤传感及光通讯技术 ·

DWDM 中基于预啁啾抑制 FWM 的优化策略

王雨行, 关莉珍, 宋锡策, 闫煜鹏, 余先伦
(重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404020)

摘要: 为了满足波分复用系统中的超高速和长距离传输, 需将影响频谱效率和系统性能的四波混频等非线性效应损害降至最低。针对四波混频产生机理, 提出了一种抑制波分复用光网络中四波混频效应的方法。该方法分别在有无预啁啾的情况下确定了第一、第二和第三优化优先级参数(如有效面积、信道间距、入纤功率)的单个和组合效应对四波混频效应的影响, 对系统误码率进行数值计算, 分析系统性能。在 16 信道系统中, 随着有效面积的增加、输入功率的减小和信道间距的增加, 光纤中的四波混频效应得以降低, 且在预啁啾情况下四波混频效应降至更低。在预啁啾为 800 ps/nm 时, 三种参数优化组合使信道中的最小误码率为 8.16×10^{-23} , 相比无参数优化和预啁啾的光纤通信系统, 性能提升 132.8 dB。最后, 这项工作表明, 所提出的基于预啁啾的参数优化策略是密集波分复用系统性能优化的理想方案。

关键词: 光纤通信; 四波混频; 预啁啾; 信道间距; 入纤功率; 有效面积

中图分类号: TN929.11; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.022

Optimized strategy for FWM suppression based on pre-chirp in DWDM

WANG Yu-hang, GUAN Li-zhen, SONG Xi-ce, YAN Yu-peng, YU Xian-lun

(School of Electronics and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China)

Abstract: In order to meet the requirements of ultra high speed and long-distance transmission in wavelength division multiplexing systems, it is necessary to minimize the damage caused by nonlinear effects such as four-wave mixing that affect spectral efficiency and system performance. In this paper, a method is proposed to suppress the four-wave mixing effect in wavelength division multiplexing optical networks based on the mechanism of four-wave mixing. This method determines the individual and combined effects of the first, second, and third optimization priority parameters (such as effective area, channel spacing, and fiber input power) on the four wave mixing effect with or without pre-chirp, and performs numerical calculations on the system bit error rate to analyze system performance. In 16 channel system, as the effective area increases, input power decreases, and channel spacing increases, the four-wave mixing effect in the fiber optic is reduced, and the four-wave mixing effect decreases even lower under pre-chirp conditions. When the pre-chirp is 800ps/nm, the optimal combination of three parameters results in a minimum bit error rate of 8.16×10^{-23} in the channel compared to fiber optic communication systems without parameter optimization and pre chirp, the performance of the system is improved by 132.8 dB. Finally, this work indicates that the proposed parameter optimization strategy based on pre-chirp is an ideal solution for optimizing the performance of dense wavelength division multiplexing systems.

Keywords: optical fiber communication; four-wave mixing; pre-chirp; channel spacing; fiber input power; effective area

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2021YFB3901405); 国家自然科学基金项目 (No. U2030116); 重庆市重点实验室“三峡库区地质环境监测与灾害预警”项目 (No. YB2020C0301) 资助。

作者简介: 王雨行 (1996-), 男, 硕士研究生, 从事光纤通信技术研究。E-mail: 1957440258@qq.com

通讯作者: 余先伦 (1967-), 男, 硕士, 教授, 从事光纤通信、激光技术和光子晶体光纤技术研究。E-mail: 839811547@qq.com

收稿日期: 2023-11-28; **修订日期:** 2024-01-12

1 引言

随着现代互联网和大数据飞速发展,人们对于数据流量的需求逐渐增加。波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术的部署是刺激光纤容量增长的第一个突破,其充分利用了光纤提供的巨大带宽^[1]。空分复用(Space Division Multiplexing, SDM),例如使用多芯光纤,已被提议用于下一代通信系统^[2-5]。然而,SDM技术仍然面临一些挑战,如光放大器的发展^[6],这对于长途传输至关重要。因此,单模光纤仍然是近期下一代长途WDM通信系统的首选技术。在现代密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统中,高数据速率下的光纤会受到一些不利影响,影响系统效率并降低系统性能。造成这种现象的主要因素是非线性效应^[7]。非线性效应的最大缺点是降低了DWDM光网络的系统性能,导致输出信号失真和信道能量浪费^[8]。

在长距离DWDM光网络系统中,重要的非线性效应包括受激拉曼散射(Stimulated Raman scattering, SRS)、四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)、自相位调制和交叉相位调制(Self-Phase Modulation/Cross-phase modulation, SPM/XPM)。经过大量非线性效应的研究,发现FWM是DWDM通信系统中容量的主要限制因素^[9]。到目前为止,已经报道了大量的研究来抑制DWDM系统中的FWM效应,这些研究使用了不等信道间距^[10]、非零色散光纤^[11]、时分复用混合波分复用^[12]、引入高阶色散^[13]、光码分多址^[14]、光学相位共轭^[15]等技术。虽然上述技术在抑制FWM方面均取得了一定的效果,但其增加了通信系统的复杂性或限制了频谱效率。此外,FWM还会受到光纤长度、有效面积、入纤功率等参数的影响^[16]。然而,之前的大多数研究都没有在预啁啾下考虑第一、第二和第三传输参数(如有效面积、信道间距、入纤功率)的单一和组合效应对FWM效应的影响。

本文提出了一种基于预啁啾的优先级优化参数策略,以减少DWDM系统中的FWM效应,提高系统性能。对光纤通信系统中的误码率(Bit Error Rate, BER)在多个参数的单一和组合效应下进行数值计算。首先,研究DWDM光网络传输系统中的FWM理论数学模型;然后,建立不同参数的单一和

组合效应下的数值计算系统和参数优化策略;最后,对不同优化参数方案的系统性能进行对比分析,得出本文结论。

2 DWDM系统中的FWM效应

DWDM光网络传输系统,利用复用器将多个不同波长的光信号耦合到同一个光纤中进行传输,创建了许多虚拟光纤,每个虚拟光纤都能够承载不同波长的信号,每个信号可以以不同的速率和格式传输,最后经过解复用器将各个光信号传输至接收端。但由于光纤的非线性,部署DWDM系统会受到限制,因此需要对光纤中的FWM等非线性效应进行抑制,以确保DWDM光网络的系统性能。

FWM是光纤中发生的一种非线性效应,当两个或多个信号在光纤内以不同波长共同传播时,会产生另外新的波长的信号(即FWM产物)。新波的频率取决于原始信号的频率。FWM是由于折射率随光功率的变化而产生的,称为光学克尔效应^[17]。当光纤中引入非线性时,光纤内光波的传播由下列非线性薛定谔方程控制:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A(z,t) + B_1 \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} + \frac{i}{2}B_2 \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} - \frac{B_3}{6} \frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^3} = -\frac{2i\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} |A(z,t)|^2 A(z,t) \quad (1)$$

式中, $A(z,t)$ 是沿光纤在时间 t 和位置 z 处的光场缓慢变化的复包络; α 是光纤损耗系数; B_1 、 B_2 和 B_3 是色散系数; n_2 表示光纤的非线性折射率系数; A_{eff} 代表光纤有效面积; λ 是激光中心波长。当频率不同的三个光波(f_i, f_j, f_k)在同一根光纤中传播时,由于FWM效应产生的新的光波分布如图1所示,其频率可用下式表示:

$$f_{\text{FWM}} = f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, k \neq i, j \quad (2)$$

在DWDM光纤通信系统中,光波在光纤中传播距离 L 之后,由FWM效应而传输到新频率光波上的功率可由以下方程计算:

$$P_{\text{FWM}} = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (D_{ijk} \chi^{(3)})^2 \left(\frac{L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}\right)^2 P_i P_j P_k \cdot \exp(-\alpha L) \eta \quad (3)$$

式中, P_{FWM} 是FWM在频率下产生的光波的功率,频率为 f_i, f_j 和 f_k 的光输入功率为 P_i, P_j 和 P_k , n 是光纤折射率, D_{ijk} 是简并因子, $i=j$ 时 $D_{ijk}=3$ (即部分简

并 FWM), $i \neq j$ 时 $D_{ijk} = 6$ (即非简并 FWM), $\chi^{(3)}$ 是三阶非线性磁化率, η 为 FWM 的效率, c 是真空中光速, L 为光纤总长度。有效长度 L_{eff} 是光纤非线性效应研究中常用的一个参数, 被定义为与有损耗光纤产生相同数量的非线性的无损耗光纤的长度, 其定义为:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (4)$$

N 个 DWDM 系统的信道将会产生的 M 个 FWM 效应的产物, N 与 M 的关系为:

$$M = \frac{N^3 - N}{2} \quad (5)$$

FWM 效率 η 是相位匹配因子 $\Delta\beta$ 的函数, 是描述光纤中 FWM 效应最有用的可测量量, 其定义为:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (6)$$

相位匹配因子 $\Delta\beta$ (即介质中相互作用的光波之间的相位关系), 通常可用下式计算:

$$\Delta\beta = \beta(f_i) + \beta(f_j) + \beta(f_k) - \beta(f_{FWM}) \quad (7)$$

式中, β 表示给定频率的传播常数, 且 $\Delta\beta$ 可用信道频率差值与色散表示为下式:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_j| |f_j - f_k| \cdot$$

$$\left[D_c + \frac{dD_c}{d\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{2c} \right) \times (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (8)$$

式中, $|f_i - f_j|$ 表示频率 f_i, f_j 的光波之间的频率差 (即频率 f_i, f_j 之间的信道间距); D_c 表示光纤色散

($\frac{dD_c}{d\lambda}$ 表示色散斜率)。而对于 N 个信道的通信系统, FWM 功率的可以用下式计算:

$$P_{FWM} = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (D_{ijk} \chi^{(3)})^2 \left(\frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 (P_i P_j P_k)^N \cdot \exp(-\alpha L) \frac{\alpha^2}{c\alpha^2 + 2\pi D_c |f_i - f_j| |f_j - f_k|} \quad (9)$$

BER 是接收端传输质量的衡量指标。具体来说, BER 是错误比特数与传输总比特数之比。在传输过程中, 信号受 FWM 效应影响产生误码率, 可通过高斯近似 (P_e) 来计算, 即:

$$P_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{t_1^2}{2}\right) dt \quad (10)$$

式中, t_1 表示时间; Q 为质量因子。 Q 可通过下式计算:

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM} + \sqrt{N_{th}}}} \quad (11)$$

由于在 DWDM 光通信系统中, 热噪声 (N_{th}) 和散粒噪声 (N_{sh}) 相对于 FWM 噪声 (N_{FWM}) 较小可以忽略不记, 因此上式(11)可以改写为:

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2 P_s P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (12)$$

式中, P_s 为接收光信号强度, FWM 噪声 N_{FWM} 为下式:

$$N_{FWM} = 2b^2 P_s \left(\frac{P_{FWM}}{8} \right) \quad (13)$$

式中, b 为响应度。因此, BER 最后可表示为下式:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi} Q} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) \quad (14)$$

式中, erfc 表示互补误差函数。上述方程用于模拟和研究长距离 DWDM 光网络中的 FWM 非线性参数。

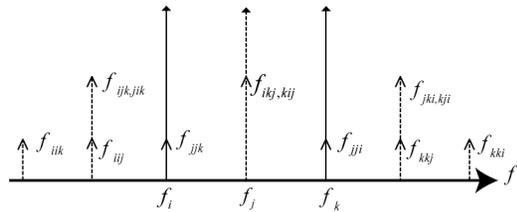


图1 FWM 产物分布

Fig. 1 FWM product distribution

3 DWDM 系统中建立数值计算系统与优化策略

针对 DWDM 光网络传输过程抑制 FWM, 建立数值计算系统, 光通信网络系统结构如图 2 所示。根据本文提出多参数优化方案, 在仿真设置中, 每个信道的发射部分包括随机比特序列发生器、脉冲整形器、CW 激光源和用于数据调制的马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM)。本工作中使用了 16 信道设置, 其中每个信道的 MZM 使用 DWDM 复用器进行组合。来自 16 个信道的每个 MZM 的输出使用多路复用器进行组合, 并在 200 km 的单模光纤上传输, 接着是 40 dB 增益的 EDFA, 然后经过 40 km 的色散补偿光纤, 最后是 20 dB 增益的 EDFA。通过光纤传输后, DWDM 解复用器为每个用户分离信道。接收部分使用光电二极管将光信号转换为电信号, 然后再进行滤波处理, 滤波过程的损耗为 2 dB。在接收端使用光谱分析仪、BER 分析仪来分析接收信号的质量

量以及 FWM 对信道内信号的影响。

在图 2 系统结构图中,共有 16 个不同波长的信道。第一个信道的频率是 193.5 THz,最后一个信道的频率根据不同方案的信道间距而定。16 × 1 的 DWDM 复用器用来组合不同输入波长的光波,使它们在同一根光纤上面进行传输,每个信道的数据传输速率固定为 10 Gbps。为防止信道之间发生串扰,复用器和解复用器的带宽设置为 11 GHz,激光发射器的线宽设置为 10 MHz。DWDM 复用器和解复用器分别在发射部分和接收部分合并和分解不同波长的光波。两个啁啾光栅提供的色散数值大小相等正负相反。16 个不同波长的光波在经复用器、单模光纤和解复用器后,利用 BER 分析仪研究各个参数组合下的方案的每个信道的 BER 与质量因子(Q 因子)性能,以 BER 衡量每个方案中 FWM 效应对系统性能的影响。针对长距离 DWDM 光网络传输过程中的 FWM 效应,计算的参数如表 1 所示。

根据优化优先级参数的单一与组合效应的计算分析,对不同参数组合情况的方案分别进行仿真实验。在每个信道的信号接收处利用误码率分析仪查看 BER,并记录分析。

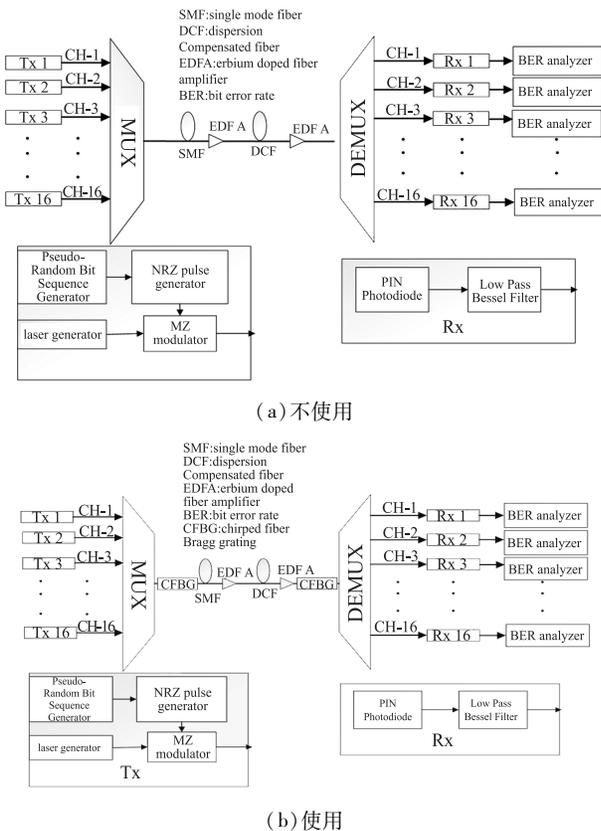


图 2 使用及不使用预啁啾的光网络系统结构图

Fig.2 Structure diagram of optical network system with or without pre-chirp

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculated parameters

Parameters	Value
Number of channels	16
Data rate per channel/Gbps	10
Single mode fiber length/km	200
Dispersion compensation fiber length/km	40
Bandwidth of MUX and DEMUX/GHz	11
Channelspacing/GHz	30 ~ 100
Laser frequencies/THz	193.5 ~ 195
Power of laser/mW	10 ~ 30
Linewidth of laser/MHz	10
Fiber center wavelength/nm	1550
Chirped fiber grating values/(ps · nm ⁻¹)	0 ~ 800
Erbium doped fiber amplifier/dB	20 ~ 40
Effective area of optical fiber/μm ²	80 ~ 200
Optical fiber attenuation/(dB · km ⁻¹)	0.2

针对 DWDM 光网络传输抑制 FWM 效应,基于预啁啾的优先级优化参数策略如图 3 所示。该策略首先在无预啁啾时计算比较三种传输优化参数单个效应(信道间距、入纤功率、有效面积)对 FWM 效应的影响,确定第一、第二和第三优先级优化参数。在最佳预啁啾值下,对第一、第二和第三优先级参数优

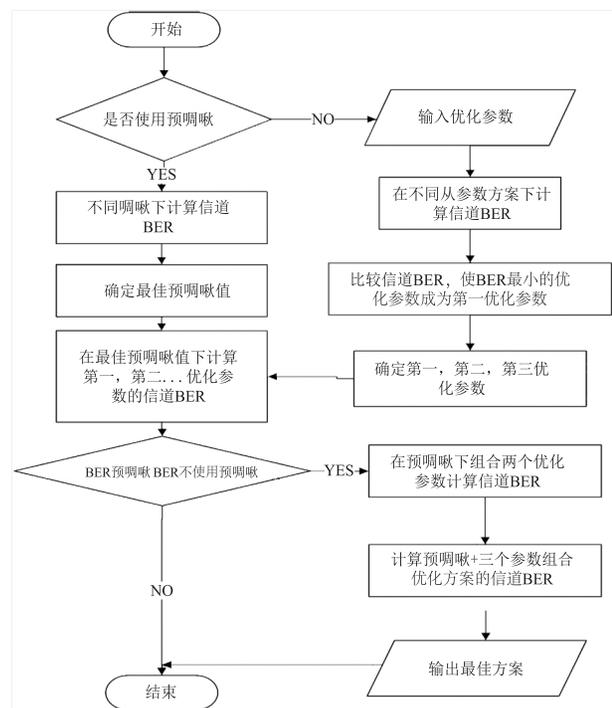


图 3 基于预啁啾的优先级优化参数策略流程

Fig.3 Priority optimization parameter strategy process based on pre-chirp

化,计算每个信道的 BER,比较有无预啁啾时的三种优化参数方案的信道 BER。最后,在最佳预啁啾值下计算第一、第二和第三优先级优化参数组合效应对 FWM 效应的影响,确定本策略的最佳方案。

4 结果与讨论

本文提出的基于预啁啾的优化参数策略,意味着在多个参数的单一和组合影响下研究 FWM 效应。此外,该策略确定了抑制 FWM 效应的最佳优化方案,如图 3 所示。采用表 1 中的计算参数,在 16×10 Gpbs 的光纤通信系统中分别对不同方案进行数值计算,得到各个方案中的每个信道的 BER 数据,如图 4~10 所示。

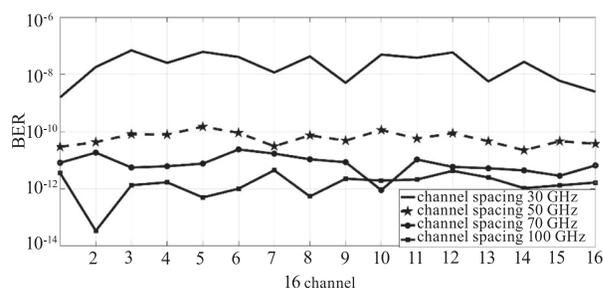


图 4 优化参数为信道间距时的信道误码率

Fig. 4 Channel BER when optimizing parameter is channel spacing

4.1 无预啁啾时单一参数的方案

在这种方案下,我们在无预啁啾时研究了所有单一参数对 FWM 效应的影响。第一个选择用来降低 FWM 效应的参数是信道间距。图 4 显示了不同信道间距情况(信道间距为 30 GHz、50 GHz、70 GHz、100 GHz)下的 FWM 效应(以每个信道的 BER 衡量 FWM 效应)。光纤通信系统中的部分参数固定为光纤输入功率为 15 mW、光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$,其余参数值为表 1 中的值。从图 4 中可以看出,在 16 信道系统中,信道间距为 30 GHz 的光纤通信系统中的最小信道 BER 为 1.57×10^{-9} ,当信道间距为 50 GHz 时最小信道 BER 为 2.23×10^{-11} ,当信道间距为 70 GHz 和 100 GHz 时,最小信道 BER 分别为 8.97×10^{-13} 和 3.4×10^{-14} 。由此可以得出,信道间距的增加可以降低光纤中的 FWM 效应,这是因为信道间距的增大会降低式(8)中不同光波之间的相位匹配因子,从而降低 FWM 效应。此外,信道间距越大,FWM 效应下降的越明显,信道中的 BER 越小,信道间距 100 GHz 比 30 GHz 的光纤通

信系统中的最小信道 BER 降低了 46.6 dB。

降低光纤中的 FWM 效应的第二个优化参数是输入光纤的功率。图 5 显示了不同输入光纤功率(入纤功率为 10 mW、15 mW、20 mW、30 mW)下的 FWM 效应。光纤中的参数固定为信道间距为 50 GHz、光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 。从图 5 中可以看出,在 16 信道系统中,入纤功率为 10 mW 情况下的光纤中的最小信道 BER 为 2.97×10^{-13} ,当入纤功率为 15 mW 时最小信道 BER 为 1.83×10^{-11} ,入纤功率为 20 mW 和 30 mW 时,光纤中的最小信道 BER 分别为 1.05×10^{-9} 和 6.44×10^{-7} 。由此得出,入纤功率的增加会增加光纤中的 FWM 效应,这是因为不同频率光波功率的增加会直接导致(9)式中 P_{FWM} 增加,增大 FWM 效应。此外,入纤功率越小,FWM 效应下降的越明显,信道中的 BER 越小,入纤功率 10 mW 比 30 mW 的光纤通信系统中的最小信道 BER 降低了 63.4 dB。

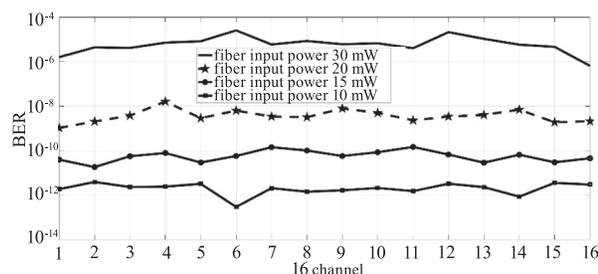


图 5 优化参数为入纤功率时的信道误码率

Fig. 5 Channel BER when optimizing parameter is fiber input power

降低光纤中的 FWM 效应的第三个优化参数是光纤有效面积。图 6 显示了不同光纤有效面积(有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 、 $120 \mu\text{m}^2$ 、 $160 \mu\text{m}^2$ 、 $200 \mu\text{m}^2$)下的 FWM 效应。光纤中的参数固定为信道间距为 50 GHz、光纤输入功率为 15 mW。从图 6 中可以看出,在 16 信道系统中,光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 时信道中的最小 BER 为 2.6×10^{-10} ,当光纤有效面积为 $120 \mu\text{m}^2$ 时最小信道 BER 为 6.09×10^{-13} ,当光纤有效面积为 $160 \mu\text{m}^2$ 和 $200 \mu\text{m}^2$ 时,信道中的最小 BER 分别为 1.01×10^{-14} 和 2.12×10^{-15} 。由此得出,光纤有效面积的增加会降低 FWM 效应,这是因为有效面积的增加会导致公式(9)中的 FWM 功率降低,降低 FWM 效应。此外,光纤通信系统中有效面积 $200 \mu\text{m}^2$ 比 $80 \mu\text{m}^2$ 的最小信道 BER 降低了 50.9 dB。

在无预啾啾时,对 16 信道系统中的单一参数信道间距、入纤功率和有效面积进行优化,信道中的 BER 优化结果如表 2 所示。根据不同单一参数优化方案中的最小信道 BER 结果确定,第一优先级的优化参数为有效面积,第二优先级参数为信道间距,第三优先级参数为入纤功率。

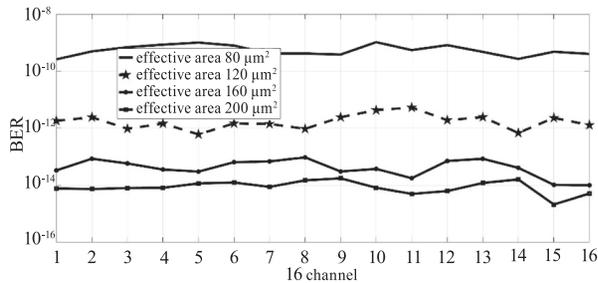


图 6 优化参数为有效面积时的信道误码率

Fig. 6 Channel BER when optimizing parameter is fiber effective area

表 2 无预啾啾的参数优化及信道误码率

Tab. 2 Parameter optimization and channel BER without pre-chirp

Optimize parameters	Value	BER
Channelspacing/GHz	30 ~ 100	$1.57 \times 10^{-9} \sim 3.4 \times 10^{-14}$
Power of laser/mW	10 ~ 30	$6.44 \times 10^{-7} \sim 2.97 \times 10^{-13}$
Effective area of optical fiber/ μm^2	80 ~ 200	$2.6 \times 10^{-10} \sim 2.12 \times 10^{-15}$

4.2 预啾啾的方案

预啾啾时(预啾啾为 50 ps/nm、200 ps/nm、400 ps/nm、800 ps/nm)计算光纤中的 FWM 效应,信道中的 BER 如图 7 所示。光纤通信系统中的部分参数固定为,光纤输入功率为 15 mW、信道间距为 50 GHz、光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$,表 1 中的部分值为其余参数值。从图 7 中可以看出,在 16 个信道中,无预啾啾的情况下光纤中的最小信道 BER 为 2.6×10^{-10} ,预啾啾为 50 ps/nm 时最小信道 BER 为 1.11×10^{-12} ,当预啾啾为 200 ps/nm 时信道中最小 BER 为 1.36×10^{-13} ,预啾啾为 400 ps/nm 和 800 ps/nm 时,信道中最小 BER 分别为 1.2×10^{-15} 和 9.72×10^{-17} 。由此得出,预啾啾的增加可以降低光纤中的 FWM 效应,且在最佳预啾啾相比无预啾啾的情况下,光纤中的 FWM 效应大幅降低,这是因为预啾啾可使光脉冲展宽,从而降低不同光波之间的相位匹配程度。随着预啾啾值的增大,FWM 效应会逐渐减小(但预啾啾值过大会使光纤中的光脉冲展宽过大,增大光脉冲之间的重叠,降低光网络性

能)。预啾啾 800 ps/nm 相比预啾啾 50 ps/nm,其信道中的最小 BER 降低了 40.6 dB,但相比不使用预啾啾的方案,其信道中的最小 BER 降低了 64.3 dB。

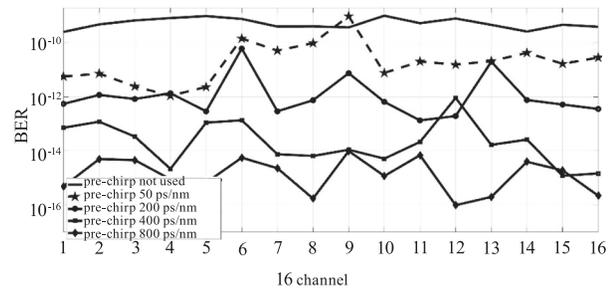


图 7 预啾啾时的信道误码率

Fig. 7 Channel BER with pre-chirp

在预啾啾为 800 ps/nm 的情况下,分别使用第一、第二和第三优先级单一参数降低光纤中的 FWM 效应(使用单一优化参数时,系统中的其余参数固定为基准参数)。图 8 显示了最佳单一参数方案对信道中 FWM 效应的影响,在预啾啾为 800 ps/nm 情况下,信道间距为 100 GHz 时,信道中的最小 BER 为 4.89×10^{-19} ,当入纤功率为 10 mW 时,信道中的最小 BER 为 5.02×10^{-17} ,有效面积为 10 mW 时,信道中的最小 BER 为 6.05×10^{-18} 。

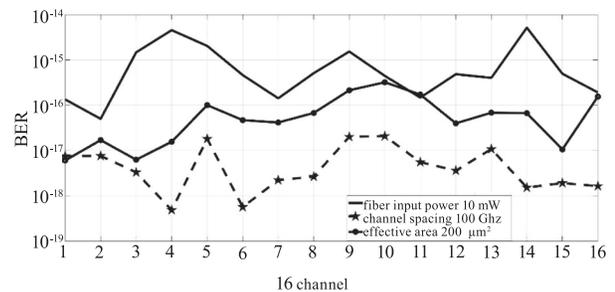


图 8 预啾啾 800 ps/nm 时最佳单一参数的信道误码率

Fig. 8 Optimal single parameter channel BER with pre-chirp of 800 ps/nm

在预啾啾为 800 ps/nm 时,对已经确定优先级的单一参数有效面积、信道间距和入纤功率等优化方案进行数值计算,信道中的最小 BER 结果如表 3 所示。比较表 2 无预啾啾的参数优化方案中的最小信道 BER,可以得出预啾啾在不改变光纤内部参数的前提下使 FWM 效应降低,提高网络性能。

4.3 预啾啾时组合参数的方案

在预啾啾为 800 ps/nm 的情况下,使用两个参数进行组合降低光纤中的 FWM 效应。图 9 显示了两个参数对信道中 FWM 效应的影响,即降低入纤功率和增加信道间距可以有效的降低 FWM 效应。从图 9 中可以看出,预啾啾为 800 ps/nm 且入纤功率为 10 mW

时,信道间距为 30 GHz 的光纤通信系统中的最小信道 BER 为 1.93×10^{-14} ,信道间距为 50 GHz 的最小信道 BER 为 1.03×10^{-17} ,信道间距为 70 GHz 的最小信道 BER 为 8.02×10^{-18} ,信道间距为 100 GHz 的最小 BER 为 4.15×10^{-19} 。这表明,在预啾为 800 ps/nm 的情况下,两个参数组合优化对比之前单参数优化方案抑制 FWM 效应具有更好效果。

表 3 预啾 800 ps/nm 时的最佳单一优化参数值及信道中最小误码率

Tab.3 Optimal single optimization parameter value and minimum BER in channel with pre-chirp of 800 ps/nm

Priority Sequence Number	Optimize parameters	Optimal value	Minimum BER
1	Effective area of optical fiber/ μm^2	200	6.05×10^{-18}
2	Channelspacing/GHz	100	4.89×10^{-19}
3	Power of laser/mW	10	5.02×10^{-17}

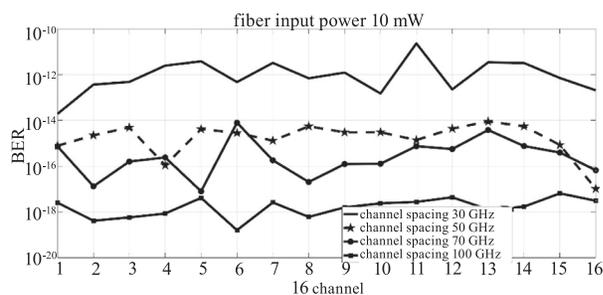


图 9 预啾时入纤功率和信道间距组合的信道误码率

Fig.9 Channel BER for combination of fiber input power and channel spacing during pre-chirp

在预啾为 800 ps/nm 的情况下,使用三个参数进行组合降低光纤中的 FWM 效应。图 10 显示了三个参数对信道中 FWM 效应的影响,即降低入纤功率、增加信道间距和增加有效面积可以有效的降低 FWM 效应。从图 10 中可以看出,预啾为 800 ps/nm 且入纤功率为 10 mW、信道间距为 100 GHz 时,光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 信道中的最小 BER 为 1.62×10^{-19} ,当光纤有效面积为 $120 \mu\text{m}^2$ 时最小信道 BER 为 1.52×10^{-20} ,当光纤有效面积为 $160 \mu\text{m}^2$ 和 $200 \mu\text{m}^2$ 时,信道中的最小 BER 分别为 2.54×10^{-21} 和 8.16×10^{-23} 。这表明,在预啾为 800 ps/nm 的情况下,三个优化参数组合对抑制 FWM 效应具有最优效果,为本文系统性能最佳的方案。

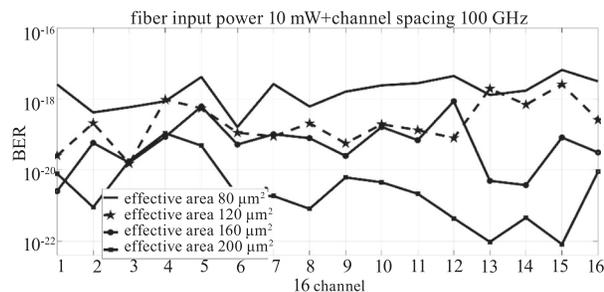


图 10 预啾时入纤功率、信道间距和有效面积组合的信道误码率

Fig.10 Channel BER for combination of input power, channel spacing and effective area during pre-chirp

5 结论

本文在长距离大容量 DWDM 光纤通信系统中研究了一种基于预啾的优先级参数优化策略,在有无预啾时优化光纤的输入功率、信道间距和有效面积等参数的单一和组合情况降低 FWM 效应。在给定不同预啾下,分别对单优先级和组合优先级参数方案的系统性能进行 BER 的数值计算与分析。结果表明,对于 16×10 Gpbs 的光纤通信系统,上述所有优化优先级参数方案都能不同程度地降低 FWM 效应,且使用预啾的方案,可以更好的抑制 FWM 效应。预啾为 800 ps/nm、有效面积为 $200 \mu\text{m}^2$ 、信道间距为 100 GHz、输入功率为 10 mW 的组合策略是将 FWM 效应的影响降低到最小值的最佳方法,使信道中的最小 BER 为 8.16×10^{-23} ,此方案与无参数优化和预啾的方案相比,将 DWDM 光网络系统性能提升 132.8 dB。在系统性能方面,预啾为 800 ps/nm 的情况下使用单个优化参数使信道中最小 BER 为 4.89×10^{-19} ,而组合优先级确保将信道中最小 BER 从 2.28×10^{-11} 降至 8.16×10^{-23} 。最后,可以推断出,通过在预啾中获得的最佳优化参数值组合,可以有效地针对 DWDM 光网络系统中的 FWM 效应进行抑制,对于 DWDM 光网络中的 FWM 效应抑制研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zang Q,Quan H L,Zhao K,et al. High-precision time-frequency signal simultaneous transfer system via a WDM-based fiber link[J]. Photonics,2021,8(8):325.
- [2] Gu Y,Tian F,Wu T Z,et al. Demonstration of the high-security 3D-CAP scheme in multi-core fiber transmission [J]. Optics Communications,2022,524:128701.
- [3] Ding Y X,Li S G,Li J S,et al. A wideband mode multi-

- plexer based on multi-core fiber structure can realize six-spatial-mode operation[J]. *Optik*,2022,267:169690.
- [4] Wang G R, Zhang J W, Zhang H, et al. A low crosstalk multi-core few-mode fiber with composite refractive index profile and air-hole embedded trench assistance[J]. *Optics Communications*,2021,499:127258.
- [5] Akhtar S M, Faisal L A, Kawsar A, et al. Numerical investigation of elliptical core few-mode fiber for next generation data transmission[J]. *International Journal of Communication Systems*,2022,35(16):e5305.
- [6] Singh M. A review on hybrid optical amplifiers[J]. *Journal of Optical Communications*,2018,39(3):267–272.
- [7] Venkatesan K, Chandrasekar A, Ramesh P. Supervised regression modelling for mitigation of four-wave mixing in dense wavelength-division multiplexing systems [J]. *Ukrainian Journal of Physical Optics*,2021,(1):22.
- [8] Asad S, Xu Y, Wang S. Research of fiber nonlinear effects in WDM-PON based 5G fronthaul networks[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 2023, 32(2):2350018.
- [9] Gurpreet S, Lal M S, Harmandar K, et al. Four-wave mixing estimation method for an optical communication system[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*,2023,104(1):175–180.
- [10] Jumpates A, Rangsanteri Y, Noppanakeepong S, et al. FWM-minimizing channel allocation algorithmic scheme for multichannel DWDM transmission system[J]. *Journal of Signal Processing*,2017,21(6):257–264.
- [11] Karlk E S. Analysis of the four-wave mixing impact on the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers[J]. *Optik*,2016,127(19):7469–7486.
- [12] Alishah K, Ullah H M, Ashiq H H, et al. Optimization of different TDM techniques in DWDM optical networks for FWM suppression[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023,55(3):206.
- [13] Bhatia R, Sharma K A, Saxena J. Improved analysis of four wave mixing with sub-plank higher-order dispersion parameters in optical communication systems[J]. *Optik*, 2016,127(20):9474–9478.
- [14] Naif A, Tawfig E, Ridzuan M M. Performance comparison of different modulation formats for a 40 Gbps hybrid optical CDMA/DWDM system against ISI and FWM[J]. *Photonics*, 2022,9(8):555.
- [15] Cao W H. Improved compensation of intrachannel four-wave mixing in dispersion-managed transmission links with mid-span optical phase conjugation[J]. *Optics Communications*,2023,530:129185.
- [16] Mohammad F J, Fadhil J M, Jaafar S K. Analysis of the effect of fiber length on fourwave mixing power in WDM optical communication system [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020,1664(1):012019.
- [17] Kasumova R J. Effects of self-phase and cross-phase modulations at four-wave mixing in optical fibers[J]. *Journal of Russian Laser Research*,2022,43(2):186–192.