

抑制光纤传输中四波混频效应的两种改进方法

毛昕蓉, 寇召飞*, 张建华

西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054

摘要 为了抑制四波混频(FWM)效应,根据其产生机理和主要影响因素,提出了对传统频率等间隔波分复用(WDM)系统的两种改进方案,一种方案是设计中间大、两头小的信道间隔,另一种方案是设计不等间隔交叉呈现的信道间隔。分别用OptiSystem软件搭建了7信道WDM系统,并进行了仿真研究。结果表明两种改进方案均能很好地抑制FWM效应,且第二种方案比第一种方案效果更好。

关键词 光通信; 光纤通信; 四波混频抑制; 信道间隔; 波分复用

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080601

Two Improved Methods of Suppression Four Wave Mixing Effect in Optical Fiber Transmission

Mao Xinrong, Kou Zhaofei, Zhang Jianhua

School of Communication Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract In order to suppress the four wave mixing (FWM) effect, two improved schemes aiming at traditional wavelength division multiplexing (WDM) systems with equal frequency intervals are proposed according to the formation mechanism and main influence factors of FWM effect. One scheme is to design a channel spacing which is broad in the middle and narrows toward each end. Another scheme is to design the channel spacing with unequal intervals. A seven-channel WDM system is established and simulated with OptiSystem. The two schemes can suppress the FWM effect and the second one is better than the first one.

Key words optical communications; optical fiber communication; four wave mixing suppression; channel spacing; wavelength division multiplexing

OCIS codes 060.2330; 060.4230; 060.4370

1 引言

对于光纤通信系统,光波分复用(WDM)技术向密集波分复用(DWDM)技术的发展,虽然大大增加了传输容量和传输距离,但也加重了光纤中的非线性效应,从而制约了整体系统性能参数的进一步提高^[1]。此外,为增加无中继传输容量,需要减小光纤传输的信道间隔,这更加重了光纤中的非线性效应,尤其加重了四波混频(FWM)效应,因此研究可有效抑制DWDM系统中FWM效应的方法非常重要。

FWM效应是指由2个或3个不同波长的光波混合后产生新的光波的现象^[1],即由某个人射光引起光纤折射率的变化可在其他一个或几个频率处产生相位调制,从而产生原来不存在的波长。如果产生的新频率落在原来的某个信道或与某个信道发生了交叠,它们之间的干扰就会变得很严重,尤其是当信道间隔和色散较小时。因此,光WDM系统中最具危害性的影响因素是由FWM效应引起的路间串扰。

本文首先研究了FWM效应的产生及其影响因素,分析得到中间信道会得到最多的混频分量数,并通过研究中间信道的光信道传输情况,将等间隔信道改变为不等间隔信道。在理论分析的基础上,设计了两种不

收稿日期: 2016-12-23; **收到修改稿日期:** 2017-03-29

基金项目: 陕西省科技研究发展计划工业攻关项目(2013K07-23,2014K06-37)

作者简介: 毛昕蓉(1975—),女,硕士,副教授,主要从事宽带网络与光通信技术方面的研究。E-mail: 2628847659@qq.com

* **通信联系人.** E-mail: 2516135514@qq.com

等间隔信道的光传输方案,一种是信道间隔为中间大、两边小的光传输系统,另一种是信道间隔以 100 GHz 和 200 GHz 交叉呈现的光传输系统。利用 OptiSystem 进行仿真分析,并将具有不等间隔信道的传输系统与传统的具有等间隔信道的传输系统进行对比,结果表明改进的不同信道间隔交叉呈现的光传输系统更难符合 FWM 相位匹配条件,从而减小了不同信道之间光波的串扰,在此基础上分别分析了两种方案的最佳入纤光功率。

2 FWM 效应的产生和影响因素分析

首先假设光纤中有两列不同频率的光波同时沿 Z 方向(光纤径向)传播,这两列光波均为沿 X 方向振动的线偏振光,则光纤中的场分布可表示为

$$E = \sum_{j=1,2} \bar{E}_j(\mu, \nu, z, t) \exp[-i(\omega_j t - \beta_{j0} z)] = \left[\int_s |F(\mu, \nu)|^2 ds \right]^{-1/2} F(\mu, \nu) \sum_{j=1,2} \bar{A}_j(z, t) \exp[-j(\omega_j t - \beta_{j0} z)], \quad (1)$$

式中 $\bar{E}_j(\mu, \nu, z, t)$ 为光场的各线偏振分量的复振幅, $F(\mu, \nu)$ 为光纤内光场的横向分布, $\bar{A}_j, \omega_j, \beta_{j0}$ 分别为两列波的复振幅、中心频率及中心频率对应的传输函数。

光纤极化强度可表示为

$$P_{NL} = \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi_{1111}^{(3)} |E|^2 E = \epsilon_0 \epsilon_{NL} E, \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为真空中的介电常数, $\chi_{1111}^{(3)}$ 为三阶电极化率, ϵ_{NL} 为极化介电常数。将(1)式代入(2)式,可得到非线性极化强度为

$$P_{NL} = P_{NL}(\omega_1) \exp[-i(\omega_1 t - \beta_{10} z)] + P_{NL}(\omega_2) \exp[-i(\omega_2 t - \beta_{20} z)] + P_{NL}(2\omega_1 - \omega_2) \exp\{-i[(2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_{10} - \beta_{20})z]\} + P_{NL}(2\omega_2 - \omega_1) \exp\{-i[(2\omega_2 - \omega_1)t - 2(\beta_{20} - \beta_{10})z]\}, \quad (3)$$

式中 $P_{NL}(\omega_1)$ 和 $P_{NL}(\omega_2)$ 分别为频率为 ω_1 和 ω_2 时的非线性极化强度, $2\omega_1 - \omega_2$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$ 为 FWM 效应产生的新频率。

考虑 4 个不同频率 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 的线偏振光相互作用的情形,如果 4 个光场具有相同的偏振方向 e_x , 则光纤中的光场可以表示为

$$E = \sum_{j=1}^4 \bar{E}_j \exp[-i(\omega_j t - \beta_j z)], \quad (4)$$

式中 β_j 为光波中心频率上的传输函数。利用三阶非线性光学效应,可以得到 X 方向上光纤的非线性极化强度为^[2]

$$P_{NL} = \sum_{j=1}^4 P_{NL}(\omega_j) \exp[-i(\omega_j t - \beta_j z)]. \quad (5)$$

(5)式对应光纤在频率 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 下的非线性极化响应[(3)式],它由许多不同频率光场的乘积项组成,其中在频率 ω_4 下的非线性响应为

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{4} \chi_{xxxx}^{(3)} \{ [|\bar{E}_4|^2 + 2(|\bar{E}_1|^2 + |\bar{E}_2|^2 + |\bar{E}_3|^2)] \bar{E}_4 + 2 \sum_{(ijk)} \bar{E}_i \bar{E}_j \bar{E}_k^* \exp(-i\theta_{ijk}) + \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^3 \bar{E}_i^2 \bar{E}_j^* \exp(-i\theta_{ij}) \}, \quad (6)$$

式中 $\theta_{ijk}, \theta_{ij}$ 为与 FWM 有关的相位因子, $\theta_{ijk} = (\omega_i + \omega_j - \omega_k - \omega_4)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_4)z$, $\theta_{ij} = (2\omega_i - \omega_j - \omega_4)t - (2\beta_i - \beta_k - \beta_4)z$; $\chi_{xxxx}^{(3)}$ 为三阶极化率分量, $xxxx$ 表示 i, j, k 的循环引用; $(ijk) = (123), (312), (231)$, 表示指标 1, 2, 3 的循环引用。方括号内的项表示自相位调整和交叉相位调整对光纤非线性极化的贡献,其余项描述了 FWM 效应。FWM 效应产生新频率的光功率满足

$$P_{ijk}(L) = \left(\frac{D_{ijk}}{3} \gamma L_{\text{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) \eta, \quad (7)$$

式中 D_{ijk} 为色散系数, γ 为非线性系数, L_{eff} 为有效作用长度, α 为光纤衰减系数, L 为传输距离, η 为 FWM 效率, p_i, p_j, p_k 为 3 个初始频率的注入功率。FWM 是介质中 4 个光波相互作用所引起的非线性光学现象, 它是由介质的三阶非线性极化所引起的。对于一段长度为 L 、色散为 D_c 的光纤, 当中心工作波长 λ 位于零色散点附近时, 非常容易产生 FWM 现象^[3]。因此, 在参数确定的情况下, 如果要对 FWM 的功率进行精确估计, 首先要对其效率进行初步的估计^[1]。FWM 效率可表示为

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left\{ 1 + \frac{4\exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\beta$ 为相位失配因子。由(8)式可以看出, FWM 效率与相位失配状态有很大联系, 当 $\Delta\beta=0$ 时, η 取最大值。因此, 要使 FWM 效率较大, 需满足上述相位匹配条件。当信道间隔为 Δf 、光速为 c 且考虑色散斜率 $dD_c/d\lambda$ 时, $\Delta\beta$ 可表示为

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} \Delta f^2 \left(D_c + \Delta f \lambda^2 \frac{dD_c/d\lambda}{c} \right). \quad (9)$$

由(7)~(9)式可以得出, FWM 效应的影响因素包括: 1) 光纤色散系数 D_c ; 2) 光纤衰减系数 α ; 3) 光纤有效长度 L ; 4) 信道间隔 Δf ; 5) 信道功率 P_n 。

FWM 效应是由 DWDM 系统中两个及两个以上信道之间的相互作用产生的, 因此研究 FWM 效应需要首先研究 DWDM 的信道间隔。信道间隔可以是均匀的, 也可以是非均匀的, 目前常用的是具有均匀间隔的信道。

DWDM 系统中的 FWM 效应使得 N 个光波长信道可能出现 M 个频率分量, M 可表示为

$$M = -\frac{1}{2}N^2(N-1). \quad (10)$$

非简并的频率成分个数 K 可表示为

$$K = \frac{1}{2}N(N-1)(N-2). \quad (11)$$

当频率分别为 f_i, f_j 和 f_k 的不同信号在同一根光纤中传输时, 这些信号通过 FWM 效应相互作用并产生新的信号 f_{ijk}, f_{jik} 可表示为

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k. \quad (12)$$

当 N 为偶数时, 中间有 2 个信道, 落在中间信道的混频分量个数为

$$n = \left[(q-1) + \sum_{p=1}^{p_1} (q-2p) + \sum_{p=1}^{p_2} (q-2p-1) \right] + \left[\sum_{p=1}^{q-1} (q-p) + \sum_{p=1}^{q-2} (q-p-1) + (q-1) \right], \quad (13)$$

式中

$$q = \frac{N}{2}, p_1 = \left[\frac{q}{2} \right], p_2 = \left[\frac{q-1}{2} \right], \quad (14)$$

其中, $[\]$ 表示取括号内表达式值的最大整数。

当 N 为奇数时, 中间信道数只有 1 个, 此时落在中间信道的混频分量个数为

$$n = \left[2 \left(\frac{q}{2} \right) + 2 \sum_{p=1}^{p_2} (q-2p) \right] + \left[2 \sum_{p=1}^{q-1} (q-p) + q \right], \quad (15)$$

式中第一个 $[\]$ 内为简并项个数, 第二个 $[\]$ 内为非简并项个数。

对于 DWDM 光传输系统, 中间信道将会得到最多的混频分量数, 因此由 FWM 效应引起的最严重的串扰发生在中间信道, 所以这里主要研究中间信道的光信道传输情况。

3 FWM 系统改进及结果分析

根据 ITU-T G.652 建议, DWDM 系统的绝对参考频率为 193.1 THz (对应的波长为 1550 nm), 不同波长的频率间隔可设置为 100 GHz 的整数倍 (对应波长间隔约为 0.8 nm 的整数倍)。

采用的信道间隔越小, 要求分波器的分辨率越高, 同时复用的信道数也应更多^[4]。FWM 效应的相位匹配条件要在特定的情况下才能满足, 由 FWM 效应产生的新频率因不相等的信道间隔而不可能与原来的信

道重合,因此对信噪比有一定程度的干扰^[5],通过添加光滤波器的办法可解决该问题,即将窄带光滤波器放在所需的信道接收机之前,便能有效地降低干扰所带来的影响^[6]。

基于7信道的光传输系统,分别设计了两种方案来研究信道间隔及其他因素对FWM效应的影响,DPSK-7信道系统框图如图1所示。图中Tx1~Tx7代表发送端,CH-1~CH-7代表信道,Rx1~Rx7代表接收端。

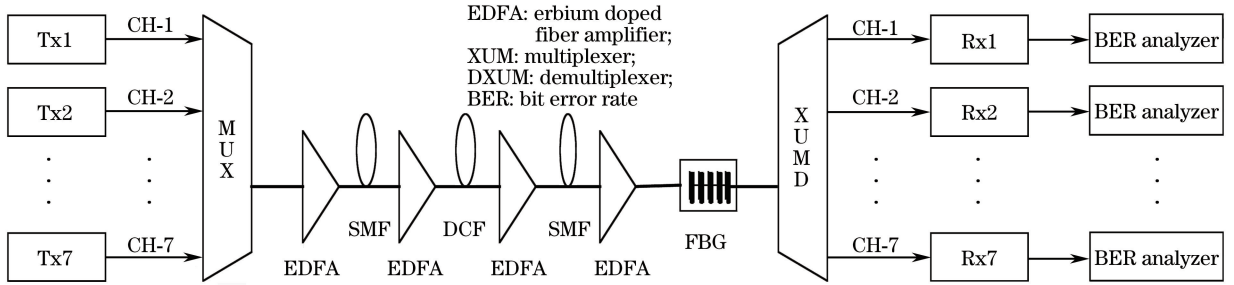


图1 DPSK-7信道系统框图

Fig. 1 Block diagram of DPSK-7 channel system

根据上述的ITU-T G.652的建议,DWDM系统的绝对参考频率为193.1 THz,不同波长的频率间隔为100 GHz的整数倍。这两种方案的光传输系统的中心频率均设置为193.1 THz,光传输速率均为40 Gbit·s⁻¹,入纤光功率均为6 dBm,光传输距离均为600 km,光传输过程中的色散补偿方式均采用静态对称补偿,同时在接收机末端加入动态布拉格光纤光栅(FBG)补偿的方式进行补偿^[7],所用放大器增益均为5 dB,输入光功率均为6 dBm,单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF)的各参数如表1所示。在实验中,为得到改进方案,首先应进行等间隔信道(传统方案)的仿真研究。

表1 实验仿真相关参数

Table 1 Parameters used in experimental simulation

Optical fiber type	Length / km	Loss / (dB·km ⁻¹)	Dispersion coefficient / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	Dispersion slope / (ps·nm ⁻² ·km ⁻¹)	Effective area / μm ²	Nonlinear coefficient / (m ² ·W ⁻¹)	Central wavelength / nm
SMF	25	0.2	17	0.075	70	2.6×10 ⁻²⁰	1550
DCF	10	0.5	-85	-0.300	22	2.6×10 ⁻²⁰	1550

3.1 设计等间隔的FWM系统(传统方案)

首先进行传统方案的仿真。设计等间隔的7个信道,其中 $f_1 \sim f_7$ 分别为光传输系统的7个信道频率,信道间隔为100 GHz。传统方案中各信道的频率 $f_1 \sim f_7$ 分别为192.8,192.9,193.0,193.1,193.2,193.3,193.4 THz。

当信道间隔为100 GHz的等间隔光传输系统传输600 km时,由OptiSystem仿真结果可得,Q值和误码率随入纤光功率的变化情况如表2所示。

为了保证通信质量,避免FWM效应,常用的方法是增加信道间隔,但是信道间隔的增加会减小通信容量,因此为了均衡这两点,提出了两种改进方案。

表2 传统方案Q值和误码率的仿真结果

Table 2 Simulation results of Q-value and bit error rate of traditional scheme

Incoming optical power / dBm	Q-value	Bit error rate
0	12.42550	9.46444×10 ⁻³⁶
1	12.88250	2.79761×10 ⁻³⁸
2	13.00840	5.40108×10 ⁻³⁸
3	9.69821	1.53076×10 ⁻²²
4	8.96088	1.60436×10 ⁻¹⁹
5	7.20899	2.80019×10 ⁻¹³
6	5.83924	2.61083×10 ⁻⁹

3.2 设计信道间隔为中间大、两头小的光传输系统(方案一)

为了避免FWM效应,应加大信道间隔,但是信道间隔都增大时会导致信道带宽利用率降低、通信容量

减小等不良后果。考虑到由 FWM 效应引起的串扰主要发生在中间信道,因此可以只增加中间信道的间隔,两边信道间隔保留。设计了信道间隔为中间大、两头小的方案,中间信道间隔为 200 GHz,两边的信道间隔为 100 GHz,光传输系统的 7 个信道频率 $f_1 \sim f_7$ 分别为 192.7, 192.8, 192.9, 193.1, 193.3, 193.4, 193.5 THz。

该方案下, DWDM 系统传输 600 km 时,利用 OptiSystem 进行仿真,得到 Q 值和误码率随着入纤光功率的变化情况如表 3 所示。

表 3 方案一下 Q 值和误码率仿真结果

Table 3 Simulation results of Q-value and bit error rate of scheme 1

Incoming optical power /dBm	Q-value	Bit error rate
0	12.61040	9.16632×10^{-37}
1	12.99750	6.21828×10^{-39}
2	12.15680	2.57871×10^{-34}
3	10.74700	3.05920×10^{-27}
4	9.31472	6.01673×10^{-21}
5	7.83067	2.41637×10^{-15}
6	5.86805	2.19735×10^{-9}

3.3 设计信道间隔为不等间隔交叉进行的光传输系统(方案二)

方案一中,前两个信道间隔及后两个信道间隔相等,只要信道间隔相等,就容易满足相位匹配条件,从而产生 FWM 效应,故可将信道间隔交叉排列,使得每个信道左右两边的间隔都不相等,这里的信道间隔为 100 GHz 和 200 GHz 交叉呈现。DWDM 系统的 7 个信道频率 $f_1 \sim f_7$ 分别为 192.7, 192.8, 193.0, 193.1, 193.3, 193.4, 193.6 THz。

该方案下, DWDM 系统传输 600 km 时,利用 OptiSystem 进行仿真,得到 Q 值和误码率随入纤光功率的变化情况如表 4 所示。

表 4 方案二下 Q 值和误码率仿真结果

Table 4 Simulation results of Q-value and bit error rate of scheme 2

Incoming optical power /dBm	Q-value	Bit error rate
0	13.08050	2.09931×10^{-39}
1	14.86040	2.96982×10^{-50}
2	12.99330	1.68308×10^{-34}
3	10.91260	1.49392×10^{-27}
4	10.72250	3.98284×10^{-27}
5	7.97069	7.87319×10^{-16}
6	6.13834	4.12782×10^{-10}

4 传统方案与改进方案的仿真比较

上节中利用 OptiSystem 仿真分别得出了同等条件下 3 种方案的不同结果,3 种方案中入纤光功率为 4 dBm 时的眼图和 Q 值分别如图 2~4 所示。

由仿真结果图可以看出,当系统的传输速率、距离等参数一定时,方案一和方案二的 Q 值均高于传统方

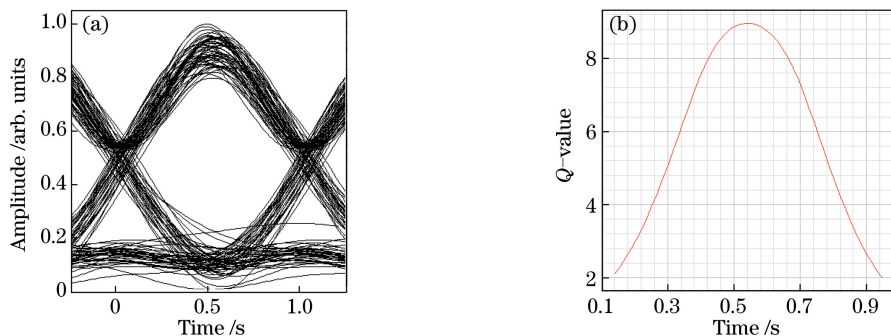


图 2 传统方案的(a)眼图和(b) Q 值

Fig. 2 (a) Eye diagram and (b) Q-value of traditional scheme

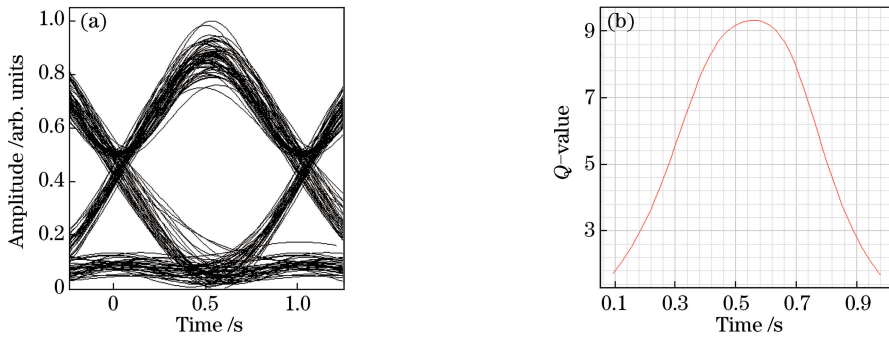


图 3 方案一的(a)眼图和(b) Q 值

Fig. 3 (a) Eye diagram and (b) Q-value of scheme 1

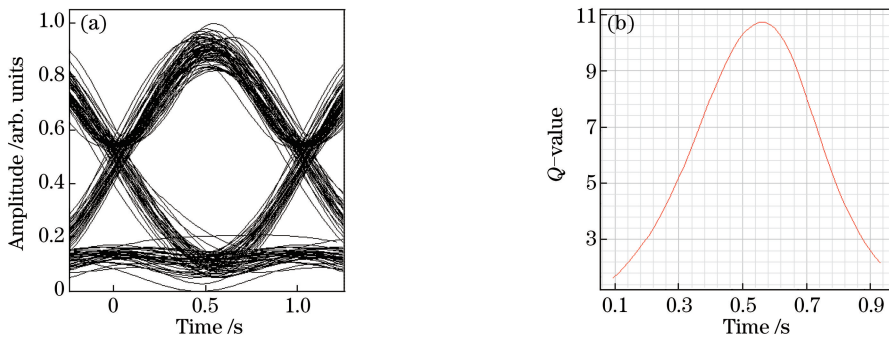


图 4 方案二的(a)眼图和(b) Q 值

Fig. 4 (a) Eye diagram and (b) Q-value of scheme 2

案的 Q 值,表明 FWM 的中间信道在设置为不等间隔信道时,能够有效减少中间信道的串扰和中间信道的混频数,使其很难产生路间串话。同等条件下 3 种方案的 Q 值比较如图 5 所示。

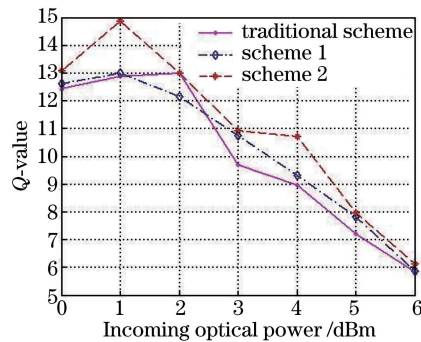


图 5 Q 值比较

Fig. 5 Comparison of Q-value

由图 5 可见,方案二的 Q 值高于方案一的 Q 值,说明信道间隔为不等间隔交叉呈现时,每一个信道左右两边的信道间隔不同,使得各个信道的串扰和混频数都减少,因此比仅拉大中间信道的方法更难满足 FWM 的相位匹配条件,从而更好地抑制了 FWM 效应。从入纤光功率的角度看,方案一的最佳入纤光功率为 1 dBm,方案二的最佳入纤光功率为 2 dBm。

5 结 论

首先将信道间隔和信道功率作为主要分析对象,论证了 FWM 效应的产生及影响因素。在中心频率为 193.1 THz、速率为 40 Gbit·s⁻¹、传输距离为 600 km 的 7 信道 DWDM 系统中,设计了两种不等间隔信道的光传输方案。分析得到两种改进方案均能有效抑制 FWM 效应,信道间隔为不等间隔交叉呈现的光传输系统(方案二)增大了宽带利用率,更难满足 FWM 相位匹配条件,有效减少了串扰和混频数,从而验证了改进方

案有利于抑制 FWM 效应,该研究在长距离、大容量、高速率的光纤通信系统中具有重要的应用价值。

虽然 FWM 效应使光在传输过程中产生了新的光波频率,不利于光信号的传输;但是 FWM 效应在很多其他方面仍具有重要的应用,例如光解复用器、全光波长变换器及色散补偿器等,因此有望设计出多种新型光器件,同时 FWM 光生毫米波技术也正在被研究。

参 考 文 献

- [1] Wang Yamin, Niu Yuefeng. Research and simulation on the inhibition FWM by dispersion compensation in DWDM[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(10): 60-62.
王亚民, 牛月凤. DWDM 中色散补偿抑制 FWM 的研究及仿真实验[J]. *光通信技术*, 2013, 37(10): 60-62.
- [2] Peng Libiao, Tian Ye, Li Bingyu, *et al.* Nonlinear optical effect of fiber and its impact on optical fiber communication [J]. *Chinese Information*, 2014(3): 9-11.
彭利标, 田野, 李冰玉, 等. 光纤的非线性光学效应及其对光纤通信的影响[J]. *中文信息*, 2014(3): 9-11.
- [3] Bi Xinying, Wang Wei, Yang Jianju, *et al.* Investigation of four-wave mixing in microstructure fiber with cladding composed of three large air-holes[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0905003.
毕新英, 王伟, 杨建菊, 等. 一种三角形微结构光纤四波混频的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0905003.
- [4] 蔡建国, 缪雪峰, 张艺引, 等. 高非线性光纤四波混频效应的理论分析与应用研究[J]. *中国电力教育*, 2012(F06): 90-95.
- [5] Wang Zhenbao, Wu Yong, Wang Ping, *et al.* Research on nonlinear effects in fiber-optic communication systems[J]. *Study on Optical Communications*, 2011(3): 25-28.
王振宝, 吴勇, 王平, 等. 光纤通信系统中的非线性效应研究[J]. *光通信研究*, 2011(3): 25-28.
- [6] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 5th ed. New York: Academic Press, 2013.
- [7] Mao Xinrong, Zhang Jianhua, Zhao Qian. Combined scheme research on static and dynamic dispersion compensation based on Optisystem[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(6): 888-892.
毛昕蓉, 张建华, 赵谦. 一种基于 Optisystem 的静态与动态色散补偿相结合方案研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(6): 888-892.