光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260111001

# DWDM模拟光链路中XPM串扰机理及光谱优化抑制方法

徐　静*，梁　旭，张　羽，蔡　珂，张　浩，庾财斌

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

**摘　要：** 通道隔离度劣化是密集波分复用模拟光链路中的关键性能瓶颈。文章通过实验与理论分析，揭示交叉相位调制在短中距传输中对串扰的主导作用。实验结果表明，通道隔离度随传输距离增加呈周期性振荡，且与入纤光功率负相关。为克服传统降功率方案引起的射频增益损失，提出并验证了一种基于亚纳米级信道波长偏移的主动光谱优化技术。通过精密偏移相互干扰的密集波分复用信道光源，在保持原有链路预算与信噪比的条件下，使通道隔离度提升5 dB以上。该技术为抑制模拟光链路中的通道串扰提供了一条新颖高效的途径。

**关键词：** 模拟光链路；非线性效应；交叉相位调制；通道隔离度；波长偏移

**中图分类号：** TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0551－05

## XPM Crosstalk Mechanism and Spectral Optimization Suppression Method in DWDM Analog Optical Links

XU Jing, LIANG Xu, ZHANG Yu, CAI Ke, ZHANG Hao, YU Caibin

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

**Abstract:** To address channel isolation degradation in dense wavelength division multiplexing (DWDM) analog optical links, this study clarifies the dominant role of cross-phase modulation in short- and medium-distance transmission through theoretical and experimental analyses. The results show that channel isolation exhibits periodic oscillations with increasing transmission distance and is negatively correlated with the input optical power. To overcome the RF gain loss caused by conventional power-reduction schemes, this paper proposes and experimentally verifies an active spectral optimization technique based on sub-nanometer channel wavelength detuning. By precisely detuning the light sources of mutually interfering DWDM channels, channel isolation is improved by more than 5 dB while maintaining the original link budget and signal-to-noise ratio.

**Key words:** analog optical links; channel isolation; cross-phase modulation; nonlinear effects; wavelength detuning

## 0　引言

随着宽带卫星互联网[1-2]、先进相控阵雷达[3-4]等技术的快速发展，对同时传输多路宽带模拟射频信号的需求日益迫切。基于密集波分复用技术的模拟光链路，因其巨大的传输容量成为实现此类功能的常用方案[5-7]。与数字光通信系统不同，模拟光链路对信号的线性度与纯净度要求极为苛刻。其中，通道间射频隔离度是衡量多载波系统性能的决定性指标之一，低隔离度将直接导致载噪比劣化、

收稿日期：2026－01－11.

*通信作者：徐　静

无杂散动态范围压缩及信号串扰，从而严重影响系统性能。

通道隔离度恶化的原因复杂，通常涉及光器件性能、链路反射及光纤非线性效应等多种因素。在短距传输中，非线性效应常被忽视。本研究通过系统实验发现，即使在千米级传输距离内，由交叉相位调制引发的非线性串扰已成为限制隔离度的主要瓶颈。此前常用的方法是通过降低入纤光功率来抑制非线性效应，但这与维持足够链路增益和信噪比的根本要求相悖。因此，探索一种不牺牲系统增益的串扰抑制方法具有重要的工程价值。

本文通过实验揭示了通道隔离度与传输距离、入纤光功率间的依赖关系，确立了交叉相位调制的主导机理，进而提出并验证了一种基于发射端光谱微调的优化策略。该方法通过精细控制密集波分复用信道波长，使其在解复用器的滤波响应上处于最优位置，从而在不改变光功率的前提下，显著抑制由非线性效应转换而来的带内串扰。

## 1 通道隔离度劣化机理分析

通道隔离度在射频域表现为一个信道信号对另一信道造成的干扰强度，其劣化是一个多物理过程耦合的结果，可从线性和非线性层面分析。

光域线性串扰主要源于波分复用/解复用器滤波性能的非理想性。当滤波器的通带滚降斜率不足或带外抑制比有限时，相邻信道的光载波及其调制边带会发生泄漏[8]。激光器的边模抑制比不足或调制引入的啁啾导致光谱展宽，进一步加剧了这种线性泄漏[9]。此类串扰与光功率呈线性关系，且在“背靠背”连接时即存在。

当多个波长的高功率光载波在光纤中共传时，光纤的非线性效应将被激发，成为产生串扰的新机制。受激布里渊散射阈值较低[10]，且其产生的后向散射光会消耗前向信号功率并可能引入噪声，但并不直接在前向传输的不同波长信道间产生耦合信号[11]，因此通常不被认为是前向信道间串扰的主要来源[12]。四波混频效应主要出现在信道间隔非常密集且光纤处于低色散区时。四波混频会产生新的频率分量，这些分量可能直接落入其他信道的通带内，形成固定的带内干扰。在密集波分复用系统中，可根据非均匀信道间隔分配[13]选择合适的波长。电光调制产生的等间隔边带虽满足四波混频的条件，但四波混频的高效产生需同时满足严格的相位匹配，在常规单模光纤中，色度色散会导致不同频率分量的波矢失配，四波混频转换效率将被抑制。相关文献的分析结果表明，在存在色散的直接探测系统中，四波混频因相位失配被显著抑制[14-15]。交叉相位调制源于光纤的三阶非线性克尔效应[16]，具体物理过程为：信道A上承载的射频强度调制，导致其光强随时间波动。此光强波动通过非线性折射率系数$n_2$，瞬时调制了光纤的折射率，使得折射率发生相应改变：

$$\Delta n(t)\approx 2n_2P_{\mathrm{A}}(t)/A_{\mathrm{eff}} \tag{1}$$

式中，$\Delta n(t)$是非线性折射率变化量，$P_{\mathrm{A}}(t)$是干扰信道A的瞬时光功率，$A_{\mathrm{eff}}$是传输光纤的有效模场面积。此时，在同一光纤中传输的、具有不同波长的信道B的光载波，其相位将受到此时变折射率的调制：

$$\Delta\varphi_{\mathrm{B}}(t)=\frac{2\pi}{\lambda_{\mathrm{B}}}\Delta n(t)L_{\mathrm{eff}}\approx 2\gamma P_{\mathrm{A}}(t)L_{\mathrm{eff}} \tag{2}$$

式中，$\lambda_{\mathrm{B}}$是被串扰信道B的波长，$L_{\mathrm{eff}}$是光纤的有效非线性作用长度，$\gamma=\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\mathrm{eff}}}$是光纤的非线性系数。这表明信道B累积的非线性相移正比于信道A的瞬时功率和有效作用长度。理论上，光电探测器仅响应光强，不直接感知相位，但实际系统中光纤的色散会诱导相位-强度转换。在色散作用下，啁啾信号的不同频率分量传播速度不同，导致时域波形展宽并产生强度起伏[17-18]。因此，信道A的射频信号便以串扰的形式出现在信道B的输出中，其串扰大小与信道A的光功率、两信道的波长间隔、调制频率及光纤的色散与长度密切相关。

## 2 交叉相位调制主导的串扰验证

### 2.1 实验系统搭建

实验系统如图1所示。两路中心波长分别为1 545.32 nm，1 542.14 nm的分布式反馈激光器作为光源，频率为16 GHz、功率为10 dBm的射频正弦波调制到马赫-曾德尔调制器，调制后的光信号经过光隔离器后通过一个200 GHz通道间隔的阵列波导光栅型波分复用器合路，随后注入不同长度的G.652.D标准单模光纤。接收端使用另一个对称的阵列波导光栅型波分复用器进行解复用出单波长光，串联一个薄膜滤波器型单通道波分复用器以减少光路

串扰，再经过光隔离器后由高速光电探测器转换为电信号，使用 15 dB 增益的射频放大器将信号放大输出。最后通过频谱分析仪测量目标信道的主信号功率与另一信道的串扰功率，以计算隔离度。

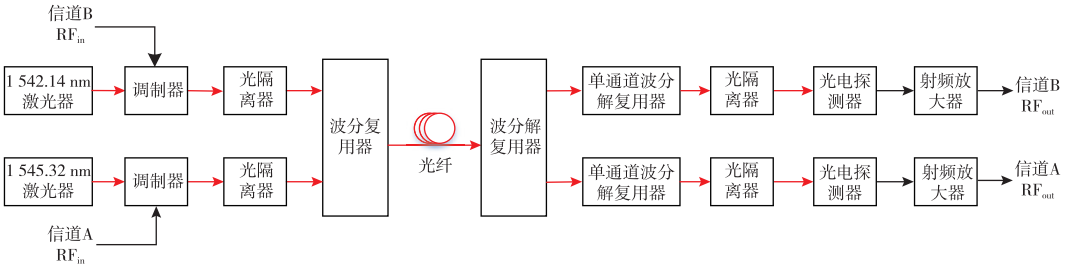



图 1　交叉相位调制主导的串扰实验系统框图

## 2.2　改变光纤长度与入纤光功率的隔离度测试结果

首先，在固定每信道入纤光功率为 8.5 dBm 的条件下，测量了隔离度随光纤长度的变化，频率为 16 GHz、功率为 10 dBm 的射频正弦波从信道 A 的 RF$_{in}$端口输入，用频谱仪分别测量信道 A、信道 B 的 RF$_{out}$端口输出功率，结果如图 2 和图 3 所示。

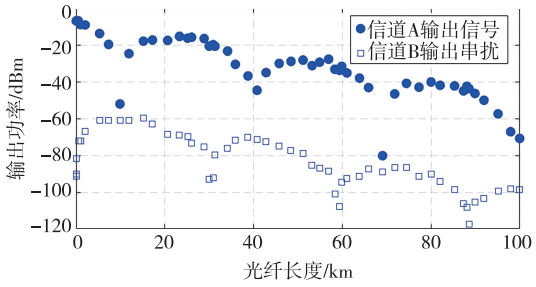



图 2　信道输出功率随光纤长度的变化

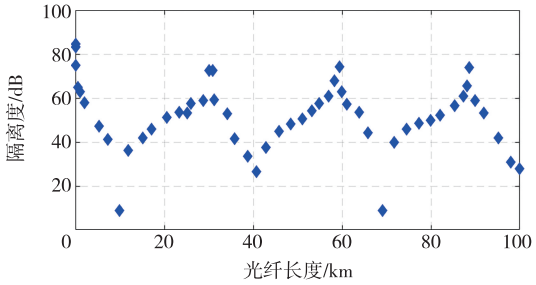



图 3　隔离度随光纤长度的变化

在较短传输距离时，信道 B 输出的串扰功率上升剧烈，伴随着隔离度快速下降。当光纤长度进一步增加，串扰功率和隔离度均呈现周期性振荡，光插损变大导致信道自身功率衰减，故信道输出功率均有整体下降趋势。使用光谱仪观察光纤长度为 2 km，1 m 时，进入波分解复用器之前的光谱如图 4 和图 5 所示。图中的标记点为调制了 16 GHz 射频信号的光波长位置。

从光谱可以看出，当使用 2 km 光纤传输时，信道 B 受到来自信道 A 的串扰较明显；使用 1 m 光纤传输时，信道 B 受到来自信道 A 的串扰不明显。将链路光纤长度固定为 2 km，改变入纤光功率，测量隔离度变化，结果如表 1 所示。

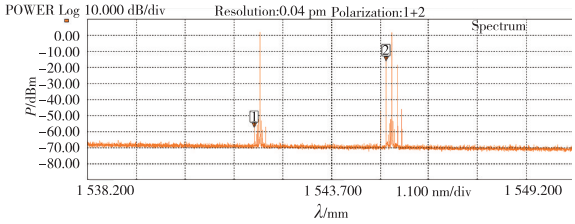



图 4　2 km 光纤传输解复用前的光谱

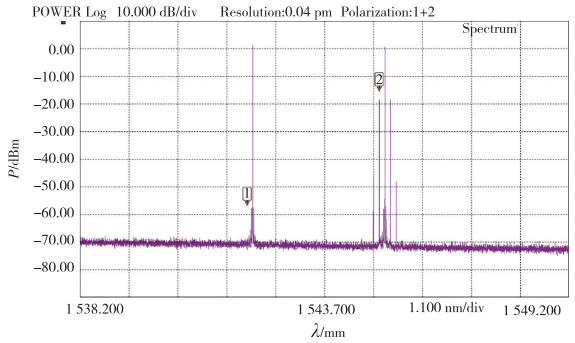



图 5　1 m 光纤传输解复用前的光谱

**表 1　通道隔离度随入纤光功率的变化**

| 入纤光功率/dBm | 信道 A 输出射频功率/dBm | 信道 B 输出射频功率/dBm | 信道 B 隔离度/dB |
|---|---|---|---|
| 8.5 | −9 | −66 | 57 |
| 5.8 | −14 | −76 | 62 |
| 2.9 | −20 | −87 | 67 |
| 0.5 | −25 | −99 | 74 |
| −2 | −30 | −107 | 77 |

当功率从 8.5 dBm 降低至 −2 dBm 时，隔离度从 57 dB 改善至 77 dB，呈现出明确的负相关性。这一现象是交叉相位调制效应的典型特征，因为交叉相位调制引起的串扰功率与干扰信道的入射功率平方成正比[19]。实验结果证明，在该实验系统中，交叉相位调制是导致隔离度随距离和功率变化的主导非线性机制。

## 3 优化方法

实验证实了降低光功率对提升隔离度的有效性。然而，在实际系统设计中，入纤光功率直接决定了链路的增益预算和最终的信噪比。降低发射功率直接导致接收光功率下降，从而使射频增益按平方关系衰减。过度降低功率则将导致接收端信号过弱，可能无法满足系统使用要求。

### 3.1 光谱偏移技术原理与实施

为突破上述限制，本研究提出一种主动的光谱管理策略。当所有密集波分复用信道精确对准ITU标准频率中心时，波分复用器对各信道具有最小的插入损耗和最优的通带平坦度，但串扰分量也恰好处于最“易通过”的位置。通过将激光器的中心波长进行亚纳米级的精密偏移，可以改变信号与串扰在解复用器滤波响应曲线上的相对位置，波长偏离示意图如图6所示。

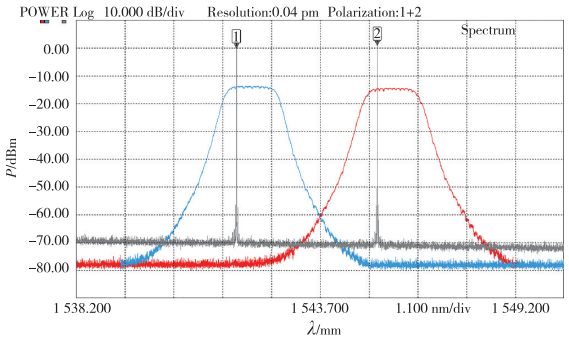



图6 激光器波长偏离波分复用器通带中心示意图

调整光波长后，目标信道的有用信号仍位于波分复用器通带中心附近，以确保低插损。因为色散系数与波长相关，调整波长后导致交叉相位调制上下边带的相位差也发生略微改变，从而串扰功率降低。

### 3.2 实验验证与效果

在保持两信道入纤光功率均为8.5 dBm、光纤长度为2 km的条件下进行验证。将两路激光器波长1 542.14 nm，1 545.32 nm均向短波长方向偏移0.3 nm，重新测量隔离度，测试结果如表2所示。

表2 激光器波长偏移后的隔离度测试

| 被串扰信道 | 信道B输出射频功率/dBm | 信道A输出射频功率/dBm | 信道B隔离度/dB | 信道A隔离度/dB |
|---|---|---|---|---|
| 信道A | −9 | −76 | | 67 |
| 信道B | −72 | −9 | 63 | |

通道隔离度从优化前的57 dB提升至63 dB，获得了6 dB的显著改善。该改善效果并非对称，信道A相对信道B的隔离度从优化前的58 dB提升至67 dB。在不降低链路射频增益的前提下实现隔离度提升，有效解决了传统方法的矛盾。偏移量需通过实验优化，过小则效果不足，过大则可能导致信道插损增加。

## 4 结论

本文通过系统实验研究，明确了在短中距密集波分复用模拟光链路中，由交叉相位调制形成的强度串扰是导致通道隔离度随距离和功率劣化的主要物理机制。针对抑制非线性与维持链路增益之间的矛盾，提出一种基于发射端亚纳米级波长偏移的光谱优化方法。实验结果证明，该方法能有效将隔离度提升5 dB以上，且无需降低系统增益，具有重要的工程实用价值。结合光器件选型与系统设计，所提出的综合优化方案可为构建高线性、高隔离度的多载波模拟光传输系统提供清晰且可靠的技术路径。

**参考文献：**

[1] Wang B, Peng L, Ho P H. Energy-efficient radio-over-fiber system for next-generation cloud radio access networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 118.

[2] Mansour A, Mesleh R, Abaza M. New challenges in wireless and free space optical communications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 89: 95-108.

[3] Stailey J E, Hondl K D. Multifunction phased array radar for aircraft and weather surveillance[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 649-659.

[4] Pan S, Ye X, Zhang Y, et al. Microwave photonic array radars[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 176-190.

[5] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

[6] Garg D, Nain A. Next generation optical wireless communication: a comprehensive review[J]. Journal of Optical Communications, 2024, 44(s1): s1535-s1550.

[7] Wong E. Next-generation broadband access networks and technologies [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 597-608.

[8] 李姝锋，袁 配，黎 婷，等. 用于FBG解调的AWG芯片的设计、仿真与制备[J]. 半导体光电，2024，45(1)：69-73.
Li Shufeng, Yuan Pei, Li Ting, et al. Design, simulation and fabrication of AWG chip for FBG demodulation [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 69-73.

[9] 朱 坤，李 辉，郝永芹，等. 分布布拉格反射器半导体激光器中光栅结构设计[J]. 中国激光，2023，50(11)：255-264.
Zhu Kun, Li Hui, Hao Yongqin, et al. Design of grating

structure in distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 255-264.

[10] Le Floch S, Cambon P. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(6): 1132-1137.

[11] Kobyakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(1): 1-59.

[12] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. Boston: Academic Press, 1989: 354-391.

[13] 徐嘉鑫，何梓昂，张芮闻，等. 面向电子战射频光传输的宽带射频信号杂散产生机理及优化方法[J]. 半导体光电，2022, 43(5): 930-934.
Xu Jiaxin, He Ziang, Zhang Ruiwen, et al. Generation mechanism and optimization method of wideband RF spurious signals for RF optical transmission of electronic warfare[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(5): 930-934.

[14] Shibata N, Braun R, Waarts R. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(7): 1205-1210.

[15] 林其银，杨胜利. WDM系统中的光纤非线性效应及其对系统的影响[J]. 光通信研究，2002(6): 22-26, 34.
Lin Qiyin, Yang Shengli. Effect of fiber nonlinear-effects on WDM communication systems [J]. Study on Optical Communication, 2002(6): 22-26, 34.

[16] Liu J M. Nonlinear Photonics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[17] Hui R, Wang Y, Demarest K, et al. Frequency response of cross-phase modulation in multispan WDM optical fiber systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9): 1271-1273.

[18] 邹新海，张尚剑，王　恒，等. 基于相位-强度调制转换的光纤色散精确测量方法[J]. 光电子·激光，2014, 25(5): 932-936.
Zou Xinhai, Zhang Shangjian, Wang Heng, et al. Accurate measurement of chromatic dispersion of optical fibers based on phase-intensity modulation conversion [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(5): 932-936.

[19] Chiang T K, Kagi N, Fong T K, et al. Cross-phase modulation in dispersive fibers: theoretical and experimental investigation of the impact of modulation frequency[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(6): 733-736.

**作者简介：**

**徐　静**(1992—)，女，重庆市人，工程师，主要从事微波光子技术研究。