光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072504

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

徐嘉鑫[1,4]，何梓昂[1]，张芮闻[2]，张博文[1]，李　璇[3]，陈　诺[3]，周　涛[1*]

（1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所，成都 610036；2. 中国电子科技集团公司电子科学研究院，北京 100041；
3. 中国电子科技集团公司重庆声光电有限公司，重庆 400060；4. 电子科技大学，成都 611731）

摘　要： 针对电子战系统的宽带射频信号波分复用传输，通过理论分析给出了微波光子链路中各关键参量对杂散信号的影响规律，提出了非均匀信道间隔分配的除杂优化方法。该方法通过微调各通道的波长，使四波混频产生的杂散频率超过电子战接收机带宽，从而降低杂散对系统的影响。该方案实现简单，且无需改变现有电子战系统架构，具有较好的工程实现性。实验结果表明：与等波长间隔相比，5通道非均匀波分复用信号传输1 km时，在接收机带宽内四波混频引起的杂散得到了显著优化，动态范围提升了26 dB以上。

关键词： 微波光子；射频光传输；四波混频

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0930－05

Generation Mechanism and Optimization Method of Wideband RF Spurious Signals for RF Optical Transmission of Electronic Warfare

XU Jiaxin[1,4], HE Ziang[1], ZHANG Ruiwen[2], ZHANG Bowen[1], LI Xuan[3], CHEN Nuo[3], ZHOU Tao[1]

(1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, CHN;
2. Electronic Science Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, CHN;
3. Chongqing Acoustic-Optic-Electronic Co., LTD. of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, CHN;
4. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN)

Abstract: Aiming at WDM transmission of wideband RF signal in electronic warfare system, this paper gave the influence rule of key parameters in microwave photonic link on spurious signal through theoretical analysis, and put forward the optimization method of non-uniform channel spacing assignment. By fine-tuning the wavelength of each channel, the frequency of spurious signals generated by four-wave mixing exceeded the bandwidth of the EW receiver, so as to reduce the influence of spurious signals on the system. The scheme was simple to implement and had good engineering implementability without changing the existing electronic warfare system architecture. The experimental results show that, compared with the uniform wavelength intervals, when the 5-channel non-uniform WDM signals is transmitted for 1 km, the spurious signals caused by four-wave mixing in the receiver bandwidth are significantly optimized, and the dynamic range is increased by more than 26 dB.

Key words: microwave photonics; RF optical transmission; four-wave mixing

收稿日期：2022－07－25.

*通信作者：周　涛　　**E-mail:** zhj_zht@163.com

0　引言

随着电子信息系统向着更大带宽、更低损耗以及分布式等方向发展，射频光传输技术在测试、通信、雷达、电子对抗等领域已经得到广泛应用[1-5]。例如在电子对抗系统中，可采用射频光传输技术实现阵列射频信号的远距离稳相传输[1]；在雷达系统中，射频光传输技术可以实现本振及参考信号的多站间传输，达到多站相参处理的目的[3]；在测试系统中，可以利用光传输技术实现射频资源传输与分配，提高系统资源利用率，同时可实现射频参考信号同步等功能[4-5]。

另一方面，波分复用技术可以大幅提高光纤的传输容量，降低光纤光缆的使用量，特别是在通信、电子战和雷达等应用中的阵列信号传输，波分复用技术可以将多路射频调制的光信号在同一路光纤中传输，显著降低因多路光纤远距离传输而引起的阵列信号相位差的波动，为大阵列电子信息系统的干涉仪测向、相参处理等提供一种可行途径。

但是，在宽带射频信号波分复用光传输系统中[6]，由于多个波长的光信号在同一根光纤中传输，彼此之间会发生四波混频效应，进而产生新的波长[7-8]。如果新的频率与光本振频率之间的间隔小于光电探测器的工作带宽，则会在宽带射频传输的过程中引入杂散信号，显著降低系统的灵敏度和动态范围等核心指标，造成电子战接收机的虚警率升高。目前，四波混频抑制方法得到了广泛研究，包括：基于光学相位共轭传输法[9]、基于正交偏振传输法[10]、色散管理[11]等。但是，上述方法大多针对骨干网通信传输，传输距离长，抑制结构较为复杂，不适用于电子战系统。

因此，面向电子战传输应用，本文通过理论分析给出了链路中各关键参量对杂散信号的影响规律，提出了非均匀信道间隔分配的杂散信号优化方法。与前述方案不同，本方案并不致力于抑制杂散本身，而是通过微调每个通道的激光器波长，使四波混频产生的杂散频率超过接收机带宽，从而降低杂散对系统的影响。该方案实现简单，且无需改变现有电子战系统架构，具有较好的工程实现性。实验结果表明：与等波长间隔相比，5 通道非均匀波分复用信号传输 1 km 时，在接收机带宽内四波混频引起的杂散得到了显著优化，动态范围提升了 26 dB 以上。

1　原理与组成

1.1　原理与组成

在电子战系统中，宽带射频信号波分复用光传输一般由电光转换单元、波分复用/解复用器、掺铒光纤放大器、光纤传输线缆以及光电转换单元构成，其原理框图如图 1 所示：

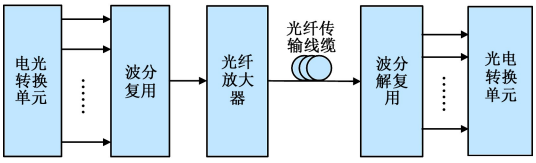


图 1　宽带射频信号波分复用光传输系统原理框图

在电子战宽带射频信号波分复用光传输系统中，多路射频孔径接收到的宽带射频信号完成调制到不同波长的光载波上，通过波分复用器将多路光载波复用到一路光纤中，再由光纤放大器对复用光信号进行增益放大，以弥补后续链路传输而带来的损耗，经光纤传输后再通过波分解复用器将合路光信号解复用到不同的光通道，进一步通过光电转换单元将每路光信号进行解调，还原出宽带射频信号，实现射频信号远距离传输至信号接收处理单元，以便完成后续信息的集中处理。通过波分复用的传输技术体制，可以大幅提高不同射频通道信号间的相位差稳定性。

1.2　理论分析

在高功率光信号的长距离传输过程中，光纤中的各种非线性效应不可忽略，本文主要关注四波混频效应引起的杂散信号[12-14]。四波混频效应属于光纤非线性效应中的三阶参量过程，简并情形下的四波混频过程原理如图 2 所示。

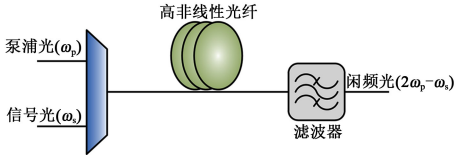


图 2　简并四波混频原理框图

角频率为 ω_p 的泵浦光与角频率为 ω_s 的信号光同时输入到非线性光纤中，经过四波混频后，频率为 $2\omega_p-\omega_s$ 的闲频光得以产生。在泵浦消耗可以忽略的情况下，闲频光的功率可以表示为

$$P_c=P_s\left(\frac{\gamma P_0}{g}\right)^2\sinh^2(gL) \tag{1}$$

式中，P_0 和 P_s 分别为泵浦光和信号光的功率，L

为光纤长度，γ 为光纤的非线性系数，g 为参量增益，受系统相位失配因子 κ 影响，可以表示为

$$g(\omega_s-\omega_p)=\sqrt{(\gamma P_0)^2-\kappa^2/4}$$

$$\kappa=\beta(\omega_s)+\beta(2\omega_p-\omega_s)-2\beta(\omega_p)+2\gamma P_0 \quad (2)$$

式中，β 为光纤的传播常数。从上式可以看出，输出闲频光的功率受输入光功率、光纤非线性系数、系统相位失配因子与光纤长度等因素的共同影响。在波分复用系统中，当闲频光的频率 ω_c 与某一路光载波频率 ω_r 相近时，经过光电转换后，对应通道输出信号将包含闲频光引入的杂散信号，可以表示为

$$P_{spur}=2\sqrt{P_cP_r}\cos[(\omega_c-\omega_r)t] \quad (3)$$

式中，P_r 为对应通道光载波的功率。由上式可以看出，可通过减小四波混频效应降低闲频光功率，进而减小系统杂散，其关键在于兼顾链路性能的同时对四波混频的影响因素进行综合调控。

以 5 通道宽带射频信号波分复用光传输系统为例，采取 200 GHz 等信道间隔设计的宽带射频信号波分复用光传输系统，光载波频率可选取为 192.2，192.4，192.6，192.8，193.0 THz。但是，在波分复用系统中，激光器需要通过 TEC 对激光器芯片进行恒温控制才能保证输出的光信号频率保持基本稳定，一般可以做到±5 GHz 以内。所以，当假设 5 个光载波的频率分别为 192.2，192.402，192.597，192.796，193.01 THz，按照这种信道分布情况，构建了如图 1 所示的光传输系统的输出信号并进行了仿真分析，由于杂散信号功率主要取决于闲频光与信道光载波的功率，在各信道光载波光功率相等的情况下，各信道的杂散信号功率也基本相等，本文选取搭建的实验系统中杂散信号功率最大的 192.402 THz 通道作为典型对象开展分析与验证，该信道输出信号频谱仿真结果如图 3 所示。

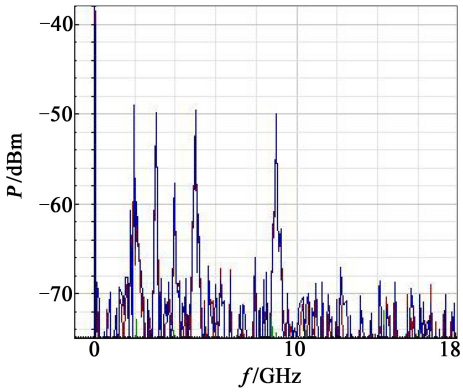


图 3 192.402 THz 通道频谱仿真图

通过图 3 的仿真结果可以看出，采用 200 GHz 等信道间隔设计的宽带射频信号波分复用光传输系统，在光载波信号存在一定频率波动的情况下，在 2～5 GHz，9 GHz 等处产生了大量杂散信号。

1.3 四波混频引起的杂散信号优化方法

根据宽带射频信号波分复用光传输系统中杂散信号产生的理论分析，抑制杂散信号可以通过增大光信号信道间隔、减小信道数量、降低光信号功率、增大光纤有效面积及色散系数等方法来实现[15]。上述方法都需要改变光传输系统的硬件配置，在某些情况下可能会难以实施或造成无法满足应用需求的后果。

本文提出了一种适用于电子战传输的非均匀信道间隔分配杂散抑制方法。通过微调光载波频率，使四波混频引起的杂散信号频率远大于接收机的带宽，超过带宽的信号则不会被接收机所响应，从而降低杂散信号对系统的影响。以上述的 5 通道波分复用光传输系统为例，我们将 5 个光载波的频率分别设置为 192.1，192.4，192.57，192.8，193.0 THz，接收机带宽为 18 GHz，按照图 1 所示的光传输系统进行仿真分析。

仿真系统光谱测量结果如图 4 所示。光载波两侧的杂散信号频率都不小于 30 GHz，在考虑到激光器输出光信号频率精度为±5 GHz 的情况下，杂散信号频率依然不小于 18 GHz。

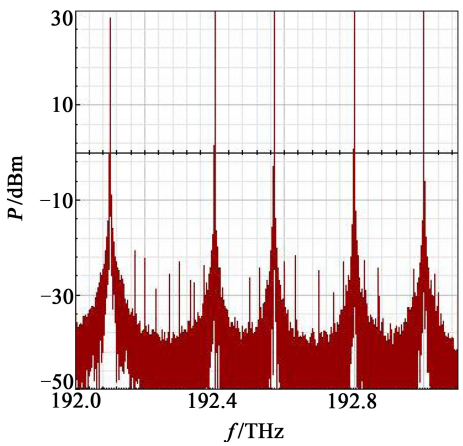


图 4 优化后的合路光谱仿真图

我们同样选取 192.4 THz 通道对光电探测器解调后的射频信号进行仿真，仿真结果如图 5 所示。18 GHz 带宽以内的杂散信号已经全部消除，通过微调光载波频率的方法优化后，宽带射频信号波分复用光传输系统可以满足工作频段 18 GHz 以内的应用需求。

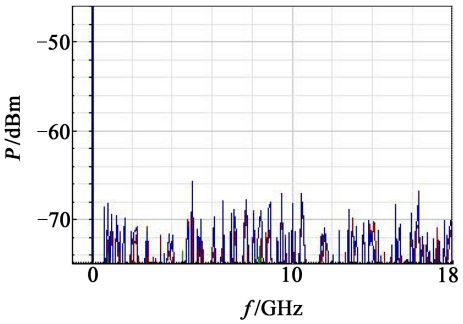


图 5　优化后 192.4 THz 通道频谱仿真图

2　实验验证

根据电子战系统中宽带射频信号波分复用光传输的理论分析及实现方案，按照光载波频率优化前与优化后的参数，按照 1 km 传输距离分别搭建桌面实验验证系统，对微调光载波频率的杂散优化方法进行实验验证。

2.1　参数优化前实验验证

实验中将 5 个激光器输出光频率设置为约 200 GHz 的频率间隔，实际输出频率为 192.164，192.374，192.581，192.795，193.979 THz，通过超高分辨率光谱分析仪，设置光谱分辨率为 0.04 pm 对波分复用合路光信号进行测试，可以清晰的看到每个光载波信号周围都存在着一定数量的杂散信号，如图 6 所示。

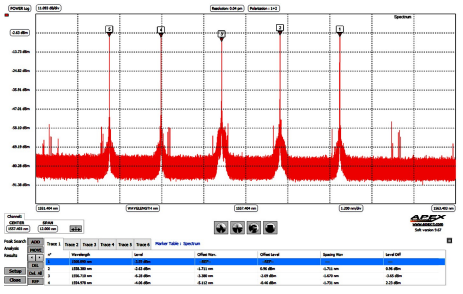


图 6　优化前合路光谱测试图

将频率为 192.374 THz 的光谱挑选出来，通过对图像进行放大观察该根谱线的细微特征，如图 7 所示。在光载波两侧存在着约 28.0 和 36.8 pm 的杂散光信号，对应与光载波的频率差为 3.5 和 4.6 GHz，这样的杂散信号与光载波信号相互作用，将会在光电探测器解调后产生 18 GHz 以内的射频杂散信号。

接着，我们将上述光通道的信号通过光电探测器单独进行解调，并通过频谱分析仪对 18 GHz 以内的信号进行测试，得到如图 8 所示的频谱测试结果，可以看到在 3.828 与 4.293 GHz 频率处产生了两个明显的杂散信号，与光谱测试结果基本一致，可以相互印证。两种测试结果频率误差是由于非同时测试情况下，光载波的频率不稳定所引入的。

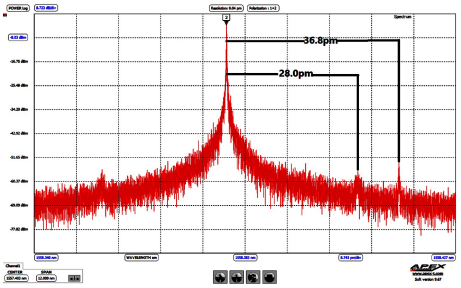


图 7　192.374 THz 光谱测试图

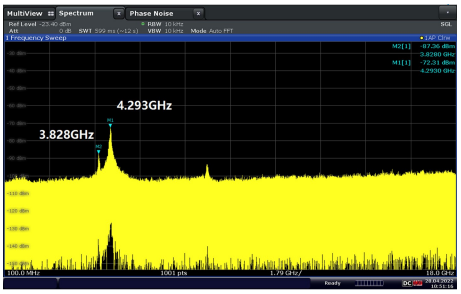


图 8　192.374 THz 频谱测试图

2.2　参数优化后实验验证

根据上述微调光载波频率优化方法的理论分析，我们将 5 个光载波的频率按照上述仿真分析中的优化方法去设置，实际输出光信号的频率为 192.089，192.397，192.557，192.783，192.979 THz，按照参数优化前同样的测试方法，所有四波混频引入的杂散信号与光载波之间的间隔不低于 0.2 nm，对应杂散信号频率将大于 25 GHz。同样以 192.397 THz 通道为例，通过对该通道光谱图像进行放大观察，如图 9 所示。在光载波频率优化后，光载波两侧 18 GHz 内的杂散光信号得到了明显优化。进一步通过频谱仪对该通道解调后的射频信号进行测试，在 18 GHz 频段内同样无明显的杂散信号。

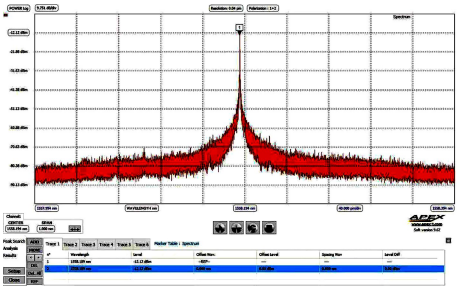


图 9　192.397 THz 光谱测试图

为了进一步研究链路的性能，优化前和优化后的链路动态范围如图 10 所示。显然，杂散优化后，动态范围提升 26.43 dB。

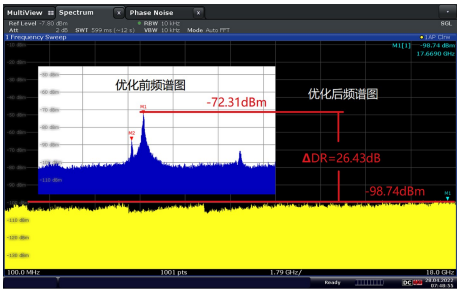


图 10 光传输系统动态范围对比图

3 结论

宽带射频信号光纤波分复用传输技术在远距离射频信号稳相传输，本振及参考信号的多站间互联，以及射频资源分配与共享方面具有其独特的技术优势，可以大幅提高电子战系统多通道传输通道之间的相位差稳定性，同时减少线缆资源，但在传输过程中产生的杂散信号会显著劣化传输系统的性能指标。本文通过理论分析结合仿真与实验，验证了非均匀信道间隔分配的杂散优化方法。以 5 通道宽带射频信号波分复用光传输系统为例，通过光载波频率微调消除了接收机带宽内由四波混频效应引入的杂散信号，动态范围提升 26 dB 以上，为宽带射频信号光纤波分复用传输系统杂散信号抑制提供了一种卓有成效的方法。

参考文献：

[1] Chen Z Y, Zhou T, Zhong X, et al. Stable downlinks for wideband radio frequencies in distributed noncooperative system[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(19): 4514-4518.

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

[3] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.

[4] Vilcot A. Microwave Photonics: From Components to Applications and Systems[M]. Kluwer Academic.

[5] Lee C H. Microwave Photonics [M]. Taylor and Francis Group, 2007.

[6] Marti J, Capmany J. Microwave photonics and radio-over-fiber research[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(4): 96-105.

[7] Schadt D G. Effect of amplifier spacing on four-wave mixing in multi-channel coherent communication[J]. Electron. Lett., 1991, 27: 1805-1807.

[8] Chen Z Y, Yan L S, Pan W, et al. One-to-nine multicasting of RZ-DPSK based on cascaded four-wave mixing in a highly nonlinear fiber without stimulated Brillouin scattering suppression[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(20): 1882-1885.

[9] Liu X, Chraplyvy A R, Winzer P J, et al. Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit[J]. Nature Photonics, 2013, 109: 1-9.

[10] Suresh H R, Vinitha V, Girinath N, et al. Suppression of four wave mixing effect in DWDM system[J]. Materials Today: Proceeding, 2021, 45: 2707-2712.

[11] Huszaník T, Turán J, Ovseník L. On mitigation of four-wave mixing in high capacity ultra-DWDM system[C]// Proc. of 20th Inter. Carpathian Control Conf., 2019: 1-4.

[12] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics (Fourth Edition)[M]. Academic Press, 2013.

[13] Agrawal G P. Applications of Nonlinear Fiber Optics (Second Edition)[M]. Academic Press, 2020.

[14] Chen Z Y, Yan L S, Pan W, et al. A transmission model of analog signals in photonic links[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(6): 7903813.

[15] 胡先志，余少华. 光纤通信基本理论与技术[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2008：19-51.
Hu Xianzhi, Yu Shaohua. Basic Theories and Techniques of Fiber-Optic Communication [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 19-51.

作者简介：

徐嘉鑫(1984—)，男，高级工程师，主要从事微波光子技术研究及产品设计；

周 涛(1978—)，男，陕西省汉中市人，博士，研究员，研究方向为电子战系统总体技术，以及微波光子处理。