微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012502

基于微波光子相干接收的宽带射频前端技术

崔 岩[1*]，徐嘉鑫[1]，杨 振[1]，龙敏慧[1]，方宇轩[2]

（1.西南电子设备研究所，成都 610036；2.重庆大学 光电工程学院，重庆 400030）

摘 要： 提出了一种适用于电子战应用的宽带大动态微波光子射频前端方案，通过采用双边带抑制载波及微波光子相干接收技术，能够有效改善前端的噪声系数、无杂散动态范围等。在6～18 GHz工作频带内，该射频前端无杂散动态范围达到110 dB·$Hz^{2/3}$、噪声系数优于8 dB、多通道幅度一致性优于±1 dB、多通道相位一致性优于±10°，实现了宽带射频信号的高性能传输，同时满足阵列光学波束需求。

关键词： 射频前端；相干接收；抑制载波；无杂散动态范围；噪声系数

中图分类号： TN929.1 **文章编号：** 1001－5868(2022)01－0084－05

Broadband RF Frontend Technique Based on Coherent Heterodyne Detection in Microwave Photonics

CUI Yan[1], XU Jiaxin[1], YANG Zhen[1], LONG Minhui[1], FANG Yuxuan[2]

(1. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, CHN;
2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, CHN)

Abstract: A broadband microwave photonic front-end that suits for electronic warfare is proposed in this paper. Significant improvement in noise figure and spur-free dynamic range is accomplished by using double sideband suppressed carrier modulation and balanced coherent heterodyne detection. In the frequency bandwidth of 6～18 GHz, a spur-free dynamic range up to 110 dB·$Hz^{2/3}$, a noise figure of 8 dB, an amplitude consistency better than ±1 dB and a phase consistency better than ±10° are implemented by using coherent detection, which makes it especially applicable for microwave photonic beam-forming, in addition to the RF transmission.

Key words: RF frontend; coherent heterodyne detection; suppressed-carrier; spur-free dynamic range; noise figure

0 引言

电子战是现代战争的重要组成形式，随着军队电子化程度的迅速提高，在未来战争中，电子战将发挥不可或缺的重要作用。为了更好地适应现代战场环境，应对日趋复杂的战场电磁环境和不断涌现的新威胁、新挑战，适应未来战场高性能信号检测与分析、综合电子干扰与电子攻击等应用，电子战装备首先应解决超宽带射频信号的高灵敏度、大动态范围传输与感知等问题[1]。传统的电学技术由于“电子瓶颈”的制约，电子系统的频带宽度难以进一步提高，限制了其在现代电子战中的应用。微波光子由于具有带宽宽、体积小、重量轻及抗电磁干扰等优点，近年来受到人们的广泛关注[2-3]。微波光子学结合了光信号和微波信号的优点，基于微波光子学的频频光传技术具有超带宽、低损耗等优势[4-5]。然而微波光子系统的强度调制器固有的非线性特性将导致输出信号中存在失真干扰[6-7]，从而导致信息的误判。对失真进行抑制可有效提升微波光子系统的无杂散动态范围，提升其对微弱信号及强信号的处理

收稿日期：2022－01－25.

*通信作者：崔 岩 E-mail：475829902@qq.com

能力。本文提出一种基于抑制载波调制与相干接收的电子战宽带射频光传输技术，它具有大带宽、大动态范围等优势，能够满足高频信号的高效传输需求。与此同时，针对二维阵列需求，传统方法是将不同阵元天线接收到的射频信号调制到不同波长的光载波上，从而实现波束形成网络的复用，大大降低了系统规模。但是，随着工作频段的不断提升，为了避免不同通道之间的信号交叠，需采用间隔不小于 200 GHz 的光载波，因此在 C 波段内用的波长资源是有限的，远不能满足大阵列的需求。因此，微波光子前端不能单纯地采用波分复用方式，而需要充分考虑波长共用问题，构建具有规模可扩展能力的微波光子前端。本文提出的大动态微波光子前端，多个通道之间具有良好的幅相一致性，能够支持电子战平台超大阵列天线部署的要求。基于相干光学波束形成网络架构如图 1 所示。

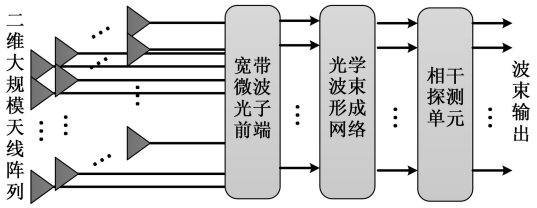


图 1　基于相干光学波束形成网络架构

1　微波光子射频前端性能分析

在电子战射频光传输系统中，微波光子前端通常采用正交的偏置方式，进而获得最优的线性化调制。然而，调制光信号中大部分成分为信号的强载波，对于某些特殊的应用场景如大规模微波光子接收阵列，光电探测器易受功率饱和影响。经过抑制载波调制后，调制光信号中大部分皆为信号边带成分，提高了电光转换效率，此时对信号进行光放大，能够最大程度地将有用信号成分放大，而不会因强载波的存在而消耗光放大器的放大资源，这也在一定程度上提高了光放大效率。另外，在注入光功率一定的前提下，采用抑制载波的调制方式，会使到达探测器的有效功率大大降低，防止探测器功率饱和，适用于大规模二维阵列。在不同注入光功率条件下，当采用传统的双边带调制方式和抑制载波调制时，探测器的调制输出功率如图 2 所示。

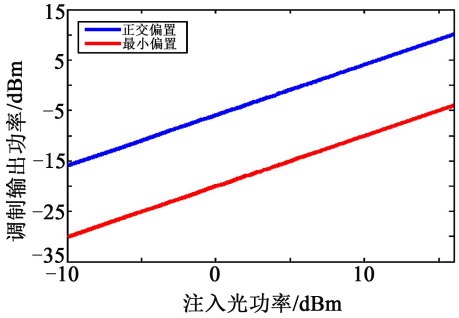


图 2　在不同偏置状态下调制输出功率随输入光功率的变化关系

2　基于相干接收的微波光子前端技术

如图 3 所示，在相干发射微波光子前端中，上路 MZM 输入的电信号为需要发射的射频信号，下路提供变频本振，假设光滤波器在理想状态下，滤波带宽内包含射频边带及本振载波，经过 PD 检测输出它们的拍频信号，即得到所需的差拍后的射频（RF）信号。

由于还有另外一路本振光存在，所以不要求信号光中含有原载波，因此可以只传输单个的信号边带，这样不仅失真被削弱很多，而且可以将链路中的放大器提供的增益都作用到信号边带上，能量利用率远远高于强度直接探测。此外，可以通过提高本振光的功率来提高系统的增益及无杂散动态范围，适用于弱信号侦收。

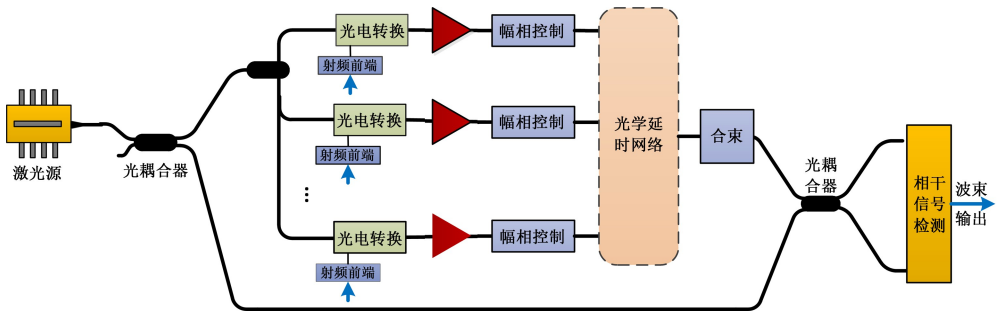


图 3　相干发射微波光子前端构成

当然，相干光学前端对光源的性能要求也更高，不仅要求激光本身的 RIN 噪声要低，还特别要求信号光与本振光之间的相干性很好，才能通过相干光学变频获得高质量的信号。电光强度调制采用抑制载波调制方式，信号输出电场可以表示为

$$E(t)=\mathrm{j}\sqrt{2P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{\varphi_{\mathrm{RF}}(t)}{2}\right) \tag{1}$$

其中，P_{opt} 为输入信号光功率，ω_{o} 为光载波角频率，$\varphi_{\mathrm{FR}}=\pi V_{\mathrm{RF}}(t)/V_{\pi}$，$V_{\mathrm{RF}}(t)$为输入射频信号，$V_{\pi}$ 为调制器半波电压。

$E_{\mathrm{LO}}(t)=\sqrt{2P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{o}})t]$ 为下路本振信号，P_{LO} 为本振信号光功率。信号光与本振光耦合进入耦合器后，输出两路信号光场，可以表示为

$$\begin{aligned}E_1=&\mathrm{j}\sqrt{P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{\varphi_{\mathrm{RF}}(t)}{2}\right)+\\&\mathrm{j}\sqrt{P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t]\\E_2=&-\sqrt{P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{\varphi_{\mathrm{RF}}(t)}{2}\right)+\\&\sqrt{P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t]\end{aligned} \tag{2}$$

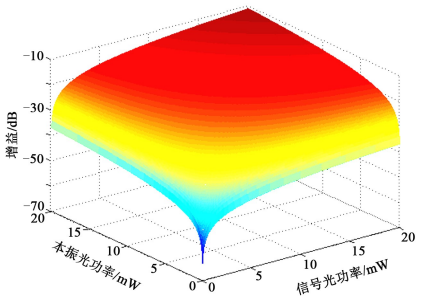
进行相干信号探测后，可以得到基频信号探测的光电流：

$$I(\omega_1)=I_1(\omega_1)-I_2(\omega_1)=4\mathcal{R}\sqrt{P_{\mathrm{LO}}P_{\mathrm{opt}}}\times J_{\mathrm{o}}\left(\frac{\beta}{2}\right)J_1\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{3}$$

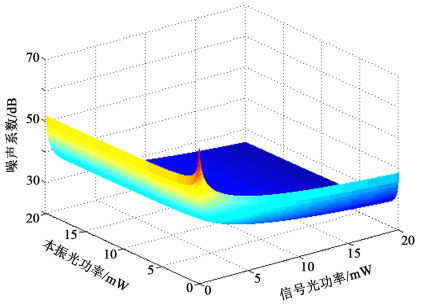
其中，$\mathcal{R}$ 为探测器响应度，β 为调制系数。

微波光子前端的性能指标主要包括增益、无杂散动态范围以及噪声系数等[8-10]。相干微波光子前端的增益与信号光功率和本振光功率的乘积成正比，而传统的微波光子前端增益与信号光功率的平方成正比，随着信号功率及本振光功率的提升，相干微波光子前端增益也会随之提高；与传统的强度调制直接检测链路中的噪声相比，相干微波光子前端的噪声特性有所不同。在相干微波光子前端中，上臂信号支路采用抑制载波的调制方式，散粒噪声及 RIN 噪声等被一定程度抑制。在接收端能够实现共模噪声抑制[11]，改善了前端的噪声系数特性；增益及噪声系数随本振光功率及信号光功率的变化关系如图 4 所示。

无杂散动态范围的改善是从两个方面考虑的，一方面，通过光学放大、本振光功率的引入能够实现通道损耗的降低和输出三阶截断点的提高，从而改善动态范围；另一方面，采用抑制载波-相干接收的信号检测方式，能够实现部分非共模噪声的降低和共模噪声的抑制。相干微波光子前端的无杂散动态范围(SFDR)随本振及信号光功率的变化关系如图 5 所示。



(a) 增益随本振光功率及信号光功率变化关系



(b) 噪声系数随本振光功率及信号光功率变化关系

图 4 相干微波光子前端增益及噪声系数随本振光功率及信号光功率变化关系

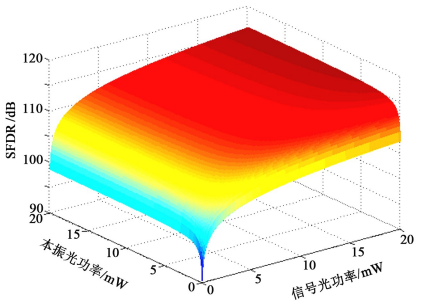


图 5 无杂散动态范围随信号光功率、本振光功率的变化关系

3 实验结果分析

由于采用抑制载波的调制方式，强载波被抑制，并且调制效率与传统的正交调制方式相比，调制效率得到提升，后续光放大器对信号边带进行了高效放大，并在接收端与本振混合实现相干信号检测。在接收端，采用相干接收体制，有效地实现了共模噪声抑制，提升了前端的噪声系数(NF)特性。针对 8～18 GHz 重点频段，对微波光子前端的噪声系数进行测试，与普通的微波光子前端相比，相干微波光子前端的噪声系数优于 8 dB，如图 6 所示。

基于搭建的四通道微波光子射频前端，对四个不同通道之间的幅相一致性进行了测试验证，结果如图 7 所示。

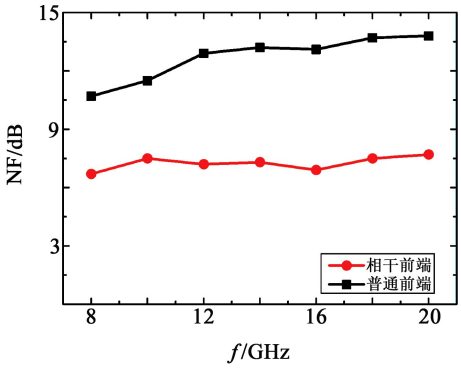
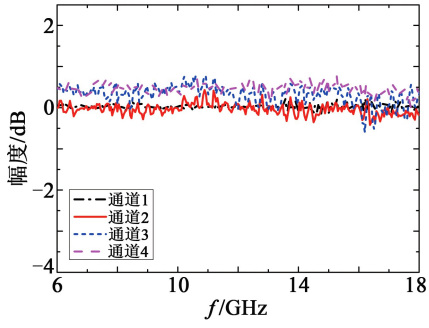
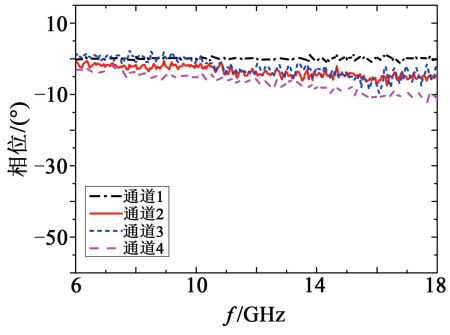


图 6　微波光子射频前端噪声系数对比



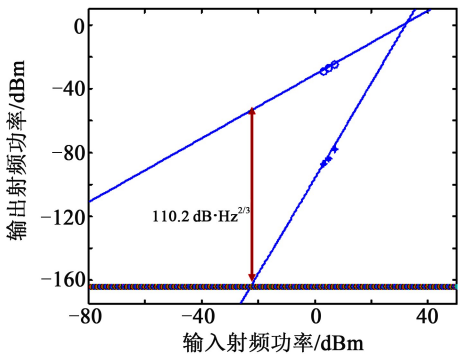
（a）　幅度一致性



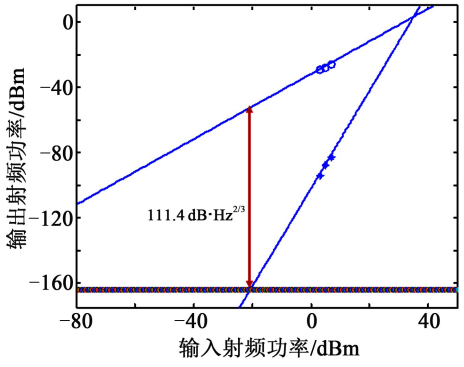
（b）　相位一致性

图 7　相干微波光子射频前端测试验证结果

由图 7 可知，通道之间的幅度一致性优于 ±1 dB，相位一致性优于 ±10°，满足阵列微波光子射频前端的需求。采用本文提出的抑制载波双边带调制及相干接收技术，前端增益及噪声特性得到改善，因此，前端的无杂散动态范围随之有效提升。采用双音测试法对前端的无杂散动态范围进行了测试，不同频点处前端的无杂散动态范围如图 8 所示。由测试结果可知，无杂散动态范围优于 110 dB·$Hz^{2/3}$。



（a）　12 GHz



（b）　18 GHz

图 8　不同频点处微波光子射频前端的无杂散动态范围

4　结论

本文提出了一种基于相干接收的宽带射频前端技术，实现了 6～40 GHz 带宽内信号高性能传输，噪声系数改善了 6～9 dB，无杂散动态达到 110 dB·$Hz^{2/3}$。多通道幅度一致性优于 ±1 dB、相位一致性优于 ±10°。同时，提出的大动态微波光子前端，多个通道之间具有良好的幅相一致性，能够支持电子战平台超大阵列天线部署的要求，可有效提升作战装备作战效能。

参考文献：

[1]　蒋盘林，涂浚洋. 射频光子技术在电子战中的应用[J]. 通信对抗，2014，33(3)：6-9.
Jiang Panlin，Tu Junyang. Applications of radio frequency photonics in electronic warfare systems[J]. Communication Countermeasures，2014，33(3)：6-9.

[2]　Jager D. Microwave Photonics-From Cencepts to Devices and Applications[M]. Lee C H，Raton E B. Micorowave Photonics. Florida：CRC-Taylor and Francis，2007：1-3.

[3]　Seeds A J，Williams K J. Microwave photonics[J]. J. Lightwave Technol.，2007，24(12)：4628-4641.

[4]　Yao J. Microwave photonics[J]. J. of Lightwave Technol.，2009，27(3)：314-335.

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

[6] 舒 平, 华 勇, 张鸿举, 等. 用于微波光子系统的铌酸锂集成电光调制器研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 783-786.
Shu Ping, Hua Yong, Zhang Hongju, et al. Research on $LiNbO_3$ integrated electro-optical modulator for microwave photonics system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(6): 783-786.

[7] 华 勇, 崔健民. 低半波电压高速铌酸锂光波导相位调制器研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(12): 1440-1443.
Hua Yong, Cui Jianmin. Study on high-speed $LiNbO_3$ optical waveguide phase modulator with low half-wave voltage[J]. Trans. of Beijing Institute of Technol., 2010, 30(12): 1440-1443.

[8] 徐 坤, 戴一堂, 李建强, 等. 宽带大动态射频光传输技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(4): 331-337.
Xu Kun, Dai Yitang, Li Jianqiang, et al. High dynamic range photonic transmission techniques for broadband RF signals[J]. J. of China Academy of Electronics and Information Technol., 2013, 8(4): 331-337.

[9] Cox I. Analog Optical Links: Theory and Practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[10] Urick V J. Long-haul analog links Tutorial[C]// 2010 Conf. on Optical Fiber Communication, 2010: 1-39.

[11] Middleton C, Desalvo R. Optical carrier suppression and balanced coherent heterodyne detection for improved performance in wide-band microwave photonic links[C]// IEEE Optical Fiber Communication Conf., 2010: OThf6.

作者简介:

崔 岩(1987—),女,辽宁省人,博士,高级工程师,主要从事微波光子信号处理、传输等相关研究。