光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022105

基于激光器RIN抑制的宽带低噪声微波光传输技术

丁　鹏，陈　诺，彭若雪，肖永川*，瞿鹏飞

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 微波光子链路中的核心器件激光器、调制器、光电探测器均为有源器件，在微波信号的电光光电转换过程中会引入额外的噪声，导致微波信号的噪声性能恶化，高的噪声系数会降低电子信息系统的灵敏度、动态范围、探测精度等关键性能指标，因此抑制噪声成为实现高性能微波光子系统的关键。文章针对当前激光器噪声较高的限制，提出采用常规分布反馈（DFB）激光器与光放大器、窄带光子滤波相组合的方式来抑制激光源噪声，实现微波光子链路的宽带低噪声。建立了微波光子链路传输模型，分析了链路性能与器件参数之间的映射关系。实测对比了采用该组合光源方案与常规微波光子链路的噪声性能，结果表明采用高功率光源结合光滤波可对激光器远端相对强度噪声（RIN）实现高的抑制，通过优化，噪声系数较常规水平可改善15 dB以上。

关键词： 微波光子；模拟光传输；噪声抑制

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0269－05

Broadband Low-noise Microwave Optical Transmission Technology Based on Laser RIN Suppression

DING Peng, CHEN Nuo, PENG Ruoxue, XIAO Yongchuan, QU Pengfei

(Chongqing Optoelectronics Technology Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Lasers, modulators, and photodetectors at the core of the microwave photonic link are active devices that introduce additional noise during the electro-optical-electrical conversion of microwave signals, deteriorating the noise performance of the microwave signals and thereby reducing the sensitivity, dynamic range, detection accuracy, and other key performance indicators of the electronic information system. Therefore, noise suppression has become critical to achieving high-performance microwave photonic systems. To overcome the limitations of current lasers with high noise, this study proposes the use of conventional distributed feedback lasers combined with optical amplifiers and narrow-band photonic filtering to suppress laser source noise and realize the broadband low-noise capabilities of the microwave photonic link. This study develops a microwave photonic link transmission model and analyzes the mapping relationship between the link performance and device parameters. The noise performances of the combined light source scheme and the conventional microwave photonic link are measured and compared, and the results show that the use of a high-power light source combined with optical filtering can achieve a high suppression of laser distal relative intensity noise (RIN). Through optimization, the noise figure can be improved by more than 15 dB compared with the conventional level.

Key words: microwave photonic; analog optical transmission; noise suppression

收稿日期：2024－02－21.

* **通信作者：**肖永川

0 引言

微波光子技术通过利用光的手段在光域实现微波信号的产生、传输、分配、处理等功能，具有工作频段高、瞬时带宽大、传输损耗低、并行处理能力强、可集成实现等优势，在雷达、通信、电子对抗、测量测控等领域具有广阔的应用前景[1-8]。由于微波光子链路核心的激光器、调制器、光电探测器均为有源器件，在微波信号的电光光电转换过程中会引入额外的噪声[9-10]，再经过光放大器放大后会进一步恶化噪声性能，高的噪声会降低系统的灵敏度、动态范围、探测精度等关键性能指标，因此抑制噪声成为实现高性能微波光子系统的关键。文献[11-15]报道了诸如采用调制器低偏或者采用平衡探测器等方案来降低噪声系数，但是调制器低偏会极大地牺牲带宽；平衡探测方案不仅会增加系统复杂度，并且不利于拉远，限制了其应用。

本文提出采用常规分布反馈(DFB)激光与光放大器、窄带光子滤波相结合的低噪声组合光源来实现微波光子链路的宽带低噪声，同时实现高效率传输。链路中设计利用光放大器提高激光器输出光功率，再利用光滤波器抑制远端噪声，这样即可得到大功率低噪声的高质量光源，再将该光源作为光载波注入到电光调制器中用于调制微波毫米波信号，采用该方式在显著降低链路噪声的同时可保证微波光子链路的宽带传输能力。

1 基本原理

宽带低噪声微波光收发链路架构如图 1 所示，包括低噪声光源、宽带电光强度调制器与宽带光电探测器三部分。其中低噪声光源由常规的 DFB 激光器、保偏光放大器和保偏窄带光滤波器组成，提供光载波。激光器输出的光信号首先经过光放大器进行功率放大，放大后送入光滤波器进行信号选通与噪声抑制，然后再作为光载波送入电光强度调制器中，射频信号在调制器电光效应的作用下调制到光载波上，经过光链路传输后送入光电探测器，将光信号转换为电域微波信号。方案中采用低噪声光放大器对激光器输出光信号进行功率放大，一方面降低对光源噪底的恶化，另一方面保证经过光滤波器抑制激光源噪声以后仍有足够高的光功率进入电光调制器，以获得散粒噪声受限条件下的高性能链路。

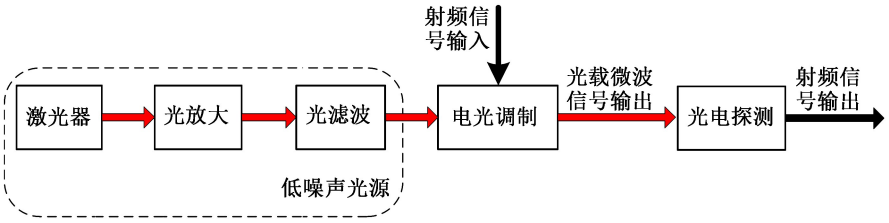


图 1 宽带低噪声微波光子链路架构

为了从理论上分析本方案的可行性，针对该架构建立信号传递模型以分析其对光载射频信号进行低噪声传输的能力。设定激光器输出光载波信号的光场表达式为：

$$E_{\mathrm{opt}}(t)=\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}t} \tag{1}$$

式中，P_{LD} 为激光器输出光功率，f_{c} 为激光器频率。在噪声的作用下，激光器的输出光场可表示为：

$$E_{\mathrm{opt}}(t)=[\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}+n_{\mathrm{RIN}}(t)]\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}t} \tag{2}$$

式中，$n_{\mathrm{RIN}}(t)$ 表示激光器的相对强度(RIN)噪声。

该信号经过光放大后，输出光场可表示为：

$$E_{\mathrm{EDFA}}(t)=\{\sqrt{g_{\mathrm{EDFA}}}[\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}+n_{\mathrm{RIN}}(t)]+n_{\mathrm{sp}}(t)\}\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}t} \tag{3}$$

式中，g_{EDFA} 表示保偏光放大器的放大增益，$n_{\mathrm{sp}}(t)$ 表示光放大器的自发辐射噪声。

光放大后的信号送入光滤波器进行信号选通与噪声抑制，则经过光滤波后的输出信号可表示为：

$$E_{\mathrm{OF}}(t)=\{\sqrt{g_{\mathrm{EDFA}}}[\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}+n_{\mathrm{RIN}}(t)]+n_{\mathrm{sp}}(t)\}\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}t}\otimes h(t) \tag{4}$$

式中，$h(t)$ 表示光滤波器的响应函数。

将抑制噪声后的光信号作为光载波送入到电光调制器中调制射频信号。射频信号可用公式表示为 $V_{\mathrm{RF}}(t)=V_{\mathrm{RF}}\cos(2\pi f_{\mathrm{RF}}t)$，则经过调制后的输出光场可表示为：

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{MZM}}(t)&=E_{\mathrm{OF}}(t)\frac{\sqrt{L_{\mathrm{MZM}}}}{2}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{\mathrm{RF}}/2}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_{\mathrm{RF}}/2})\\ \theta_{\mathrm{RF}}&=\theta_{\mathrm{B}}+\frac{\pi V_{\mathrm{RF}}\cos(\omega_{\mathrm{RF}}t)}{V_{\pi\mathrm{RF}}}\\ \theta_{\mathrm{B}}&=\frac{\pi V_{\mathrm{B}}}{V_{\pi\mathrm{DC}}}\end{aligned} \tag{5}$$

式中，L_{MZM} 为调制器光插损，V_{RF} 为射频信号电压，V_B 为调制器直流偏置电压，$V_{\pi RF}$ 为调制器射频半波电压，$V_{\pi DC}$ 为调制器直流半波电压。

将该信号送入光电探测器，经过光电探测后的输出信号可以表示为：

$$I_{pd}(t)=\mathcal{R}_{pd}\left\langle E_{MZM}(t)\times E_{MZM}^{*}(t)\right\rangle \tag{6}$$

式中，$\mathcal{R}_{pd}$ 表示探测器的响应度。

2　仿真与分析

根据上式可进一步得到微波光传输链路的增益、噪声与器件参数之间的对应关系。

2.1　链路增益

根据上式可知，链路射频增益为：

$$G_{RF}=10\lg\frac{\left[\mathcal{R}_{pd}P_{LD}L_{MZM}g_{EDFA}L_{OF}\pi\sin\theta_B Z\right]^2}{4V_{\pi RF}^2} \tag{7}$$

式中，Z 为阻抗，L_{OF} 为光滤波器的插损。令 $I_{dc}=\mathcal{R}_{pd}P_{LD}L_{MZM}g_{EDFA}L_{OF}/2$，对于常规的电光调制器射频半波电压为 $V_{\pi RF}=5$ V，射频阻抗为 $Z=50\ \Omega$。图 2 是在正交偏置条件下，光链路射频传输效率随光电流之间的变化关系的仿真结果。

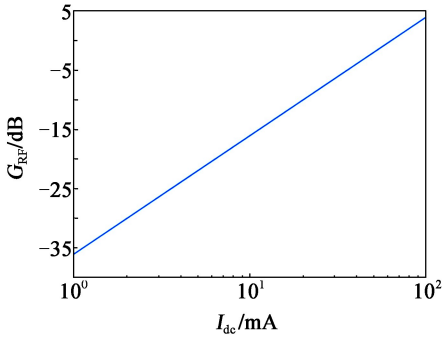


图 2　链路增益与光电流之间的关系

2.2　噪声特性

对于该微波光传输链路，噪声系数是表征链路噪声特性的重要参数。为了分析链路的噪声系数，首先需要分析链路的噪声来源与传递特性。微波光传输链路的主要噪声来源包括探测器散粒噪声、输入输出热噪声以及激光器引入的相对强度噪声和光放大器引入的自发辐射噪声。由于微波光传输链路具有较高的链路光功率，受到 RIN 噪声不足的限制，在高光功率条件下激光器 RIN 噪声将占主导，因此本方案针对激光器 RIN 噪声进行重点抑制，以降低链路噪声系数。

微波光传输链路噪声系数可表示为：

$$NF=10\log\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}=10\log\frac{N_{out}}{G_{RF}kTB} \tag{8}$$

其中，

$$N_{out}=\frac{I_{dc}^2Z}{2}\times RIN(f)B+2eI_{dc}ZB+(G_{RF}+1)kTB \tag{9}$$

式中，$RIN(f)$ 为激光器经过光放大器放大与光滤波后的噪声分布，k 是玻尔兹曼常数，T 是绝对温度，B 是带宽，e 是电子电荷。图 3 所示为在不同 RIN 条件下，链路噪声系数随光电流的变化关系。从图中可知，当链路中光源引入的 RIN 噪声得到充分抑制后，在散粒噪声受限的条件下，可通过提高光源功率获得尽可能高的链路传输效率与更优的噪声特性。

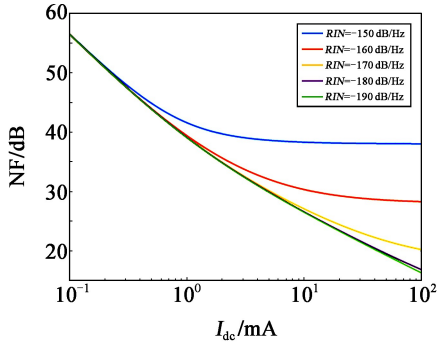
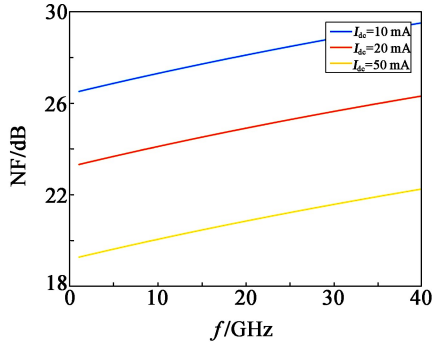
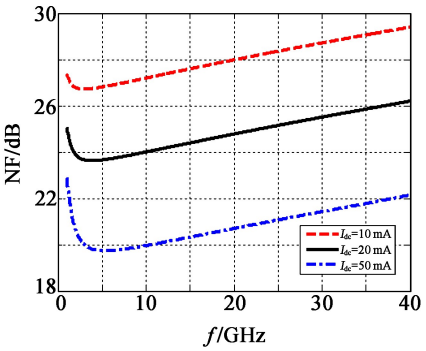


图 3　不同激光器 RIN 条件下，噪声系数与链路光电流之间的关系

图 4 为微波光子链路噪声系数对比仿真结果图，其中图 4(a)为未经过 RIN 噪声抑制的仿真结果(设定激光器 RIN 为典型值，约为−160 dB/Hz)；图 4(b)为采用光滤波器对 RIN 进行抑制后的噪声系数仿真结果，从图中可知，经过了光源噪声抑制处理后的微波光子链路噪声系数得到较大改善，而且光电流越大、链路光功率越高，噪声系数改善越多，通过仿真可知噪声系数可改善一个数量级以上。因此，



(a) 未抑制光源噪声



(b) 抑制了光源噪声

图 4 光源噪声抑制前、后的微波光子链路噪声系数

采用光滤波器对光源相对强度噪声进行抑制后，即使在高的光功率水平条件下，链路噪声仍主要取决于散粒噪声，通过该方式，可获得超低噪声、超高效率的微波光传输链路。

3 测试结果

根据图 1 所示的链路架构，本文采用货架产品搭建了宽带低噪声微波光传输链路，并对其性能进行了测试。其中光源采用自主研制的 GG9992S 型大功率低噪声 DFB 激光器，其输出光功率为 19 dBm，工作波长为 1 551.72 nm；保偏光放大器输出光功率为 27 dBm；窄带的保偏光滤波器采用薄膜滤波器，其中心波长为 1 551.72 nm，通带宽度为 50 GHz；调制器采用自研的 67 GHz 宽带电光强度调制器(型号：GC15MZPH7813)；探测器采用 Finisar 公司的 50 GHz 高速光电探测器(型号：XPDV2120R)。与此同时还测试了常规宽带微波光子链路的性能指标作为对比，常规宽带微波光子链路采用与宽带低噪声微波光传输链路相同的 DFB 激光器、调制器和探测器组成链路。

图 5 为经过以上两种光收发链路微波信号的传输效率随频率的变化关系，从图中可知采用组合光源，光放大器提升光载波功率，从而使得链路具有高的传输效率。

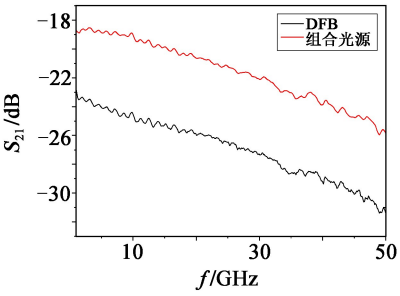


图 5 常规 DFB 激光器链路与组合光源链路传输特性对比

图 6 给出了常规微波光链路与宽带低噪声微波光链路的噪声系数的对比结果。由于受 DFB 激光器谐振峰的影响，激光器在 45 GHz 时的 RIN 噪声上升，从而引起链路的噪声系数上升，从图中可知，得益于光滤波器对 DFB 激光器远端噪声的抑制，采用组合光源的方式相较于常规的 DFB 激光器，其链路的远端噪声系数优化了 15 dB 左右。需要说明的是，由于受到所采用的光滤波器带宽的限制，测试结果表明远端噪声系数改善较大，近端噪声系数几乎没有影响，如果采用精细度更高的集成光子滤波器[16]则可以同时实现对光源近端以及远端 RIN 的抑制，进而可实现超宽带低噪声微波光传输。结合微波集成微波光子技术，有望缩小链路体积，以利于在大规模系统中应用。

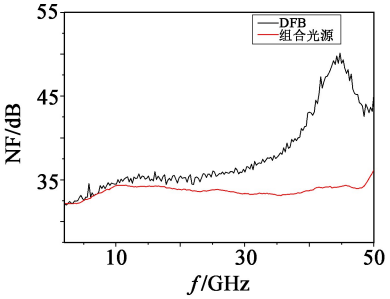


图 6 常规 DFB 激光器链路与组合光源链路噪声系数对比

4 结语

本文针对激光器、调制器等有源光子器件性能不足引起的微波光子链路噪声恶化严重的问题，提出采用常规 DFB 激光与光放大器、窄带光子滤波相结合的低噪声组合光源来实现微波光子链路的宽带低噪声，同时实现高效率、低噪声传输。该方案利用光放大器提高激光器输出光功率，再利用光滤波器抑制远端噪声，这样即可得到大功率低噪声的高质量光源，再将该光源作为光载波注入到电光调制器中用于调制微波毫米波信号。经过实验验证，该方案相较于常规的微波光子传输链路，其增益提高了 5 dB 左右，远端噪声系数优化了近 15 dB。采用该方式在显著降低链路噪声的同时可保证微波光子链路的宽带传输能力。该链路在高分辨雷达成像、宽带射频拉远、宽带电子对抗等系统具有广泛的应用潜力。

参考文献：

[1] Yao J P, Capmany J. Microwave photonics[J]. Science China (Information Sciences), 2022, 65(12): 49-112.

[2] 周　涛，刘静娴，陈智宇，等. 超宽带阵列化微波光子处理技术[J]. 光学学报，2022，42(17)：376-390.
Zhou Tao，Liu Jingxian，Chen Zhiyu，et al. Ultra wideband array microwave photon processing[J]. Acta Optica Sinica，2022，42(17)：376-390.

[3] 潘时龙，张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报，2017，35(20)：36-52.
Pan Shilong，Zhang Yamei. Microwave photonic radar and key technologies[J]. Science & Technol. Review，2017，35(20)：36-52.

[4] Zhou P，Zhang R，Li N，et al. An RF-source-free reconfigurable microwave photonic radar with high-resolution and fast detection capability[J]. J. of Lightwave Technol.，2022，40：2862-2869.

[5] Zhang Z，Liu Y，Benjamin J. Eggleton，photonic generation of 30 GHz bandwidth stepped-frequency signals for Radar applications[J]. J. of Lightwave Technol.，2022，40：4521-4527.

[6] Xu K. Microwave photonics integrated system and its applications[C]// Optoelectronic Devices and Integration，2014：OTh2C.2.

[7] Marpaung D，Yao J P，Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photon.，2019，13(2)：80-90.

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

[9] 肖永川，刘绍殿，陈　诺，等. 相位调制微波光传输链路特性分析[J]. 半导体光电，2022，43(1)：73-78.
Xiao Yongchuan，Liu Shaodian，Chen Nuo，et al. Phase modulated microwave optical transmission link characteristics[J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(1)：73-78.

[10] 瞿鹏飞，肖永川，庾财斌，等. 微波光子链路中的附加相位噪声分析[J]. 半导体光电，2020，41(4)：555-559.
Qu Pengfei，Xiao Yongchuan，Yu Caibin，et al. Analysis of addictive phase noise in microwave-photonic links with external modulation[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(4)：555-559.

[11] Morton P A，Khurgin J B，Morton M J. All-optical linearized Mach-Zehnder modulator[J]. Opt. Express，2021，29(23)：37302-37313.

[12] Urick V J，Godinez M E，Devgan P S，et al. Analysis of an analog fiber-optic link employing a low-biased Mach-Zehnder modulator followed by an erbium-doped fiber amplifier[J]. J. of Lightwave Technol.，2009，27(12)：2013-2019.

[13] Ackerman E，Betts G，Burns W，et al. Low noise figure，wide bandwidth analog optical link[C]// 2005 Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics，2005：325-328.

[14] Ackerman E I，Cox C H. Microwave photonic links with gain and low noise figure[C]// LEOS 2007-IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings，2007：38-39.

[15] Ackerman E I，Betts G E，Burns W K，et al. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques[C]// 2007 IEEE/MTT-S Inter. Microwave Symposium，2007：51-54.

[16] Gertler S，Otterstrom N T，Gehl M，et al. Narrowband microwave-photonic notch filters using Brillouin-based signal transduction in silicon[J]. Nature Communications，2022，13(1)：1947.

作者简介：

丁　鹏(1979—)，男，2002年毕业于长春理工大学光电子技术专业，获学士学位，高级工程师，主要从事半导体光电子器件、光电传输技术研究。