光电技术及应用

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20250117001

基于偏置点优化的直调链路性能研究

彭若雪，陈　诺，肖永川，瞿鹏飞*，华　勇
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 噪声系数与二阶谐波抑制比是衡量微波光子链路性能的关键指标。噪声系数表征信号信噪比的劣化程度，主要受激光器相对强度噪声、探测器散粒噪声以及电路热噪声影响；二阶谐波抑制比（2nd-HD Suppression Ratio，2HD）反映系统抑制非线性失真的能力。针对直调微波光链路性能优化问题，提出了基于偏置点调控的双目标优化方法。通过建立直调光链路传递模型，对器件参数与链路性能之间的映射关系进行理论分析。实测对比了不同直调激光器输出光功率条件下，链路噪声系数和二阶谐波抑制比。结果表明，在直调激光器线性工作区内，保持链路增益稳定，将1 550 nm激光器输出光功率降低3 dBm可使噪声系数改善2.6 dB，而2HD恶化2.44 dB。研究表明，噪声系数与谐波抑制比存在制约关系，需根据实际应用需求合理选择最优偏置工作点，这为直调链路在通信、雷达及传感系统中的自适应优化提供了理论依据。

关键词： 微波光子学；直调光传输链路；噪声系数；二阶谐波抑制比；偏置点优化
中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0122－05

Performance Study of A Directly Modulated Optical Link Based on Bias Point Optimization

PENG Ruoxue, CHEN Nuo, XIAO Yongchuan, QU Pengfei, HUA Yong
(**Chongqing Optoelectronics Technology Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: Noise figure (NF) and second harmonic distortion suppression ratio (2HD) are critical metrics for evaluating the performance of microwave photonic links. The NF characterizes the degradation of the signal-to-noise ratio and is primarily influenced by laser relative intensity noise, detector shot noise, and thermal noise. The 2HD reflects the limitation of nonlinear distortion on signal integrity. This paper proposes a dual-objective optimization method based on bias point adjustment to address the performance optimization of directly modulated microwave photonic links. The mapping relationships between the device parameters and link performance are theoretically analyzed based on establishment of a transfer model for the directly modulated optical link. Experimental measurements compare the NF and 2HD under different output power levels of the directly modulated laser. The results show that within the linear operation region of the laser, reducing the output power of a 1 550 nm wavelength laser improves the NF by 2.6 dB and maintains consistent link gain but deteriorates the 2HD by 2.44 dB. The study demonstrates a significant trade-off between the NF and harmonic suppression ratio, which necessitates dynamic selection of the optimal bias point based on practical application requirements. This work provides a foundation for flexible optimization of directly modulated links in communication, radar, and sensing systems.

Key words: microwave photonics; direct-modulated optical transmission links; noise figure;

收稿日期：2025－01－17.
***通信作者：**瞿鹏飞

second harmonic distortion suppression ratio；bias point optimization

0　引 言

微波光子学是微波与光子学深度融合形成的交叉学科，通过光子学技术实现微波信号的高效产生、传输和处理，旨在突破传统微波技术在响应速率和传输宽带等方面的局限性[1-10]。对于微波光子链路而言，要实现高保真的信号传输需要高线性度、高增益与低噪声系数。然而，在直调链路中激光器完成电光转换，以及光电探测器完成光电转换，均会引入相对强度、散弹等额外噪声[11-12]，这会导致链路噪声系数恶化，同时，激光器的非线性特性会引发二阶谐波失真。因此，实现高保真信号传输需同时优化噪声系数与谐波抑制比。为降低噪声，文献[13-15]采用了数字信号处理（DSP），但该方法可能导致系统响应延迟，且DSP芯片需要专用的硬件和软件，增加了系统成本。文献[16]采用了预加重技在发送端增加信号的高频分量，然而该处理方法可能会引入信号失真，限制了其应用。

本文提出一种基于偏置点动态调控的双目标优化方法，通过建立直调链路传递模型，揭示激光器输出功率与 NF 的定量映射关系。理论分析与实验表明：链路的噪声系数随着直调激光器输出光功率的减小而降低，此时二阶谐波抑制比减小，即使得谐波抑制变差。与此同时激光器的斜率效率保持不变，因此通过降低直调激光器驱动电流，降低直调激光器的输出光功率可以在保持增益不变的情况下改善直调链路的噪声系数。

1　基本原理

直调光链路原理如图 1 所示，射频信号加载到直调激光器上完成电光转换，直调激光器发出的调制光信号再经过光电探测器进行光电转换，恢复射频信号。

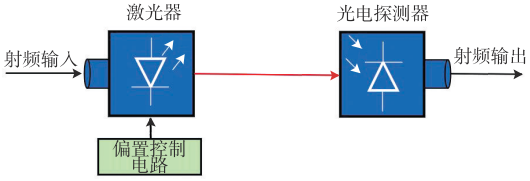

图 1　直接调制链路原理图

直接调制是控制直调激光器的注入电流 I，从而使其输出光的强度得到调制，直调激光器的 P-I 特性曲线如图 2 所示。直调激光器是阈值型器件，当激光器的输入电流低于阈值电流 I_{th} 时，激光器的自发辐射占主导地位从而发射宽光谱荧光，此时，光功率随注入电流上升较慢。当输入电流高于阈值电流 I_{th} 而低于饱和电流 I_{sat} 时，激光器内部的粒子大多数处于激发态，光功率随注入电流增加而增长，上升很快且呈线性变化关系，当驱动电流增大到饱和电流 I_{sat} 时，输出光功率达到饱和，继续提升注入电流对光功率的提升效果不明显。

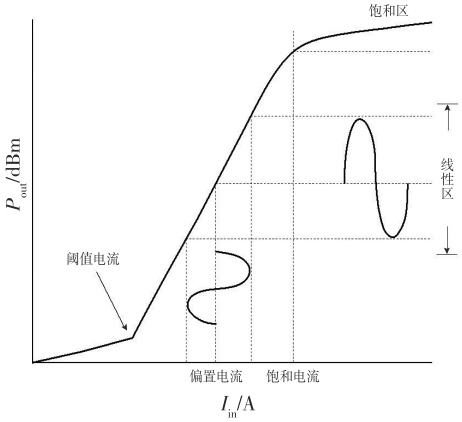

图 2　直调激光器的 P-I 特性曲线

为分析直调微波光链路中射频信号的传输性能，建立从激光器到探测器的传递关系，进一步得出链路增益、噪声系数等射频性能指标。为得到该模型，从链路中激光器出发，推导出链路增益和噪声系数。

当直调激光器工作在线性区域时，其输出光功率可表示为：

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{out}} &= S(I_{\mathrm{bias}} - I_{\mathrm{th}} + I_{\mathrm{sig}(t)}) \\ &= P_{\mathrm{bias}} + S\frac{V_{\mathrm{in}(t)}}{Z_{\mathrm{in}}} \end{aligned} \tag{1}$$

式中，$P_{\mathrm{bias}}=S(I_{\mathrm{bias}}-I_{\mathrm{th}})$，$S$ 表示激光器的斜率效率，I_{bias} 表示激光器的偏置电流，I_{th} 表示激光器阈值电流，$I_{\mathrm{sig}(t)}$ 表示输入电流，$V_{\mathrm{in}(t)}=V_{\mathrm{RF}}\cos(\omega_{\mathrm{RF}}t)$ 表示输入射频信号，Z_{in} 表示输入阻抗。

将电信号调制到光载波上后，被光探测器接收到，将带有调制信号的光信号恢复为电信号。设光电探测器响应度为 R，则光电探测器恢复的光电流为：

$$I_{\mathrm{out}}=R\left[P_{\mathrm{bias}}+S\frac{V_{\mathrm{RF}}}{Z_{\mathrm{in}}}\cos(\omega_{\mathrm{RF}}t)\right] \tag{2}$$

得到射频信号的平均功率为：

$$P_{\mathrm{RF,out}}=\frac{V_{\mathrm{RF}}^2}{2Z_{\mathrm{in}}}SR^2 \tag{3}$$

则整个链路上的固有增益为：

$$g=SR^2/4 \tag{4}$$

可知直调链路增益主要由激光器的斜率效率S和探测器的响应度R决定。直调微波光链路的噪声主要包括激光器相对强度(RIN)噪声、探测器散粒(shot)噪声及热(thermal)噪声。热噪声是与接受光功率无关的变量，散粒噪声和RIN噪声均与探测光电流呈正相关。输出总噪声N_{out}由上述三种噪声组成，可表示为：

$$N_{\mathrm{out}}=N_{\mathrm{th}}+N_{\mathrm{shot}}+N_{\mathrm{RIN}} \tag{5}$$

热噪声是导体中带电粒子在热运动过程中产生的随机噪声，链路中由热噪声所导致的总噪声可表示为：

$$N_{\mathrm{th}}=k_{\mathrm{B}}T(g+1) \tag{6}$$

由散粒噪声所导致的总噪声可表示为：

$$N_{\mathrm{shot}}=2qI_{\mathrm{d}}R \tag{7}$$

激光器的相对强度噪声RIN所导致的总噪声可表示为：

$$N_{\mathrm{RIN}}=RIN\times I_{\mathrm{d}}^2R \tag{8}$$

因此，噪声系数NF可表示为：

$$NF=10\log\left(1+\frac{1}{g}+\frac{2qI_{\mathrm{d}}R}{gkT}+\frac{RIN\times I_{\mathrm{d}}^2R}{gkT}\right) \tag{9}$$

式中，g为链路射频增益，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度。

图3为实测的1 550 nm激光器在5、6、7、8 dBm四个功率下的RIN噪声关系图。由图可知，随着频率的增加，链路的RIN噪声呈现出先增大到弛豫振荡峰，然后逐渐减小的趋势。曲线表明，在相同功率下，频率减小，RIN噪声也逐渐降低。

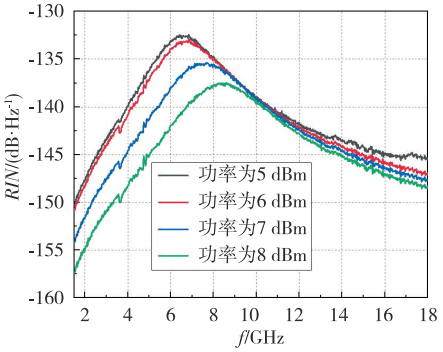

图3 不同功率下激光器的RIN噪声

图4为在Matlab中仿真噪声分布随光电流的变化关系曲线，可以看出，当光电流较小时，噪声功率较低。由公式(9)及图4可知，噪声系数NF在散粒噪声限制的范围内随I_{d}的增大而增大，而当激光器噪声为主要噪声源时，噪声系数NF随I_{d}^2的增大而增大。

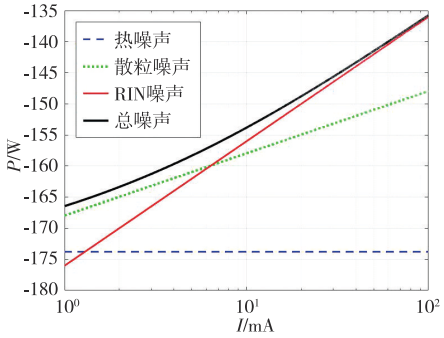

图4 噪声分布随光电流的变化关系曲线

光电流的计算式为：

$$I_{\mathrm{d}}=RP_{\mathrm{d}} \tag{10}$$

式中，R为探测器响应度，P_{d}为激光器输出光功率。根据推导可知，当直调激光器工作在线性区域时，通过降低直调激光器偏置点，减小激光器输出光功率，探测光电流随之减小，散粒噪声与RIN噪声降低，继而使得噪声系数改善，与此同时由于激光器的斜率效率不变，增益也保持不变。

2 测试结果

2.1 噪声系数*NF*测试结果

根据图1所示的链路架构，实验采用矢量网络分析仪对微波光传输链路的性能进行测试。其中直调激光器波长为1 550 nm，工作频率覆盖范围为6 GHz。探测器采用GD45221R型高速InGaAs光电探测器。图5为1 550 nm激光器在不同的输出光功率下链路的S_{21}响应曲线，当光功率发生变化时，增益差距在0.1 dB内，基本保持不变。

图6为1 550 nm激光器在不同的输出光功率下链路的NF响应曲线，在1 550 nm波段，随着激光器输出光功率从8 dBm下降到5 dBm，其噪声系数改善了2.6 dB，且在频率为2.7～4.5 GHz范围内改善越明显。

由图5和图6可知，实验验证了通过降低直调激光器偏置点，减小激光器输出光功率，继而噪声系数得到改善，同时激光器的斜率效率不变，所以增益保持不变。

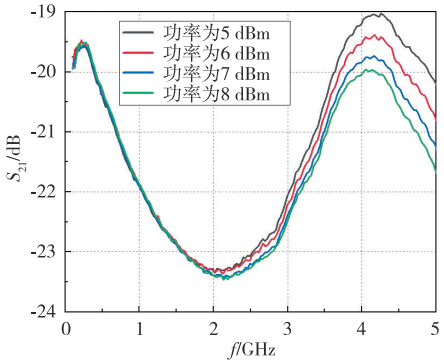

图 5　不同功率下的频率响应特性

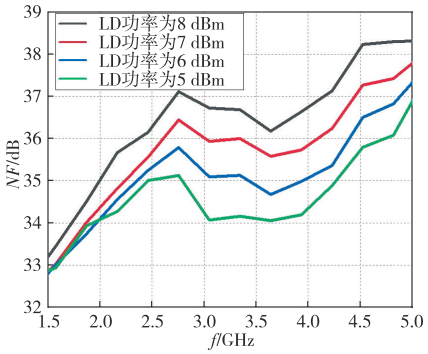

图 6　不同功率下的噪声系数对比

同时，由图 5 可观察到在 8 dBm 条件下，链路增益相比 5、6、7 dBm 有所降低。由公式（4）可知，增益 g 仅与激光器的斜率效率和探测器响应度有关。推测实验所用的直调激光器在输出光功率为 8 dBm 时，偏置电流已接近激光器的饱和区，如图 2 所示。在光饱和区，激光器的斜率效率减小，导致了 8 dBm 处增益降低。因此受限于实验所用的直调激光器线性工作区域不足，噪声系数改善并不十分明显。提高激光器的饱和光功率，延长激光器的线性区有助于进一步验证该方法的改善效果。

2.2　二阶谐波抑制比 2HD 测试结果

谐波是直调激光器 P-I 曲线的非线性导致信号在被光电探测器探测到后，出现了二倍频率分量等谐波分量。表 1 为输入频率为 2 GHz，通过测试基频和二倍频的功率并计算出激光在不同功率下的 2HD 结果。

由图 7 可知，在相同的输入功率下，随着激光器光功率从 5 dBm 上升至 7 dBm，其二阶谐波抑制比增大。实验验证了通过提高直调激光器偏置点，增大激光器输出光功率，继而使二阶谐波抑制比增大，降低谐波成分在信号中的占比，从而提高信号的纯度。

同时，观察到在 8 dBm 条件下，链路的二阶谐波抑制比相比 5、6、7 dBm 有所降低。和前文推导的结果相印证，实验所用的直调激光器在出光功率为 8 dBm 时，偏置电流已接近激光器的饱和区，此时二次谐波上升，导致谐波抑制比降低。

表 1　相同输入频率下，激光器在不同功率下的 2HD 对比结果

射频输入功率/dBm	激光器功率/dBm			
	5	6	7	8
−10	52.34 dB	54.57 dB	55.71 dB	38.36 dB
−6	48.50 dB	50.92 dB	51.33 dB	34.49 dB
−2	43.70 dB	46.27 dB	47.84 dB	30.89 dB
0	41.58 dB	42.76 dB	44.02 dB	28.99 dB
2	38.19 dB	41.74 dB	43.29 dB	27.33 dB
6	34.23 dB	37.83 dB	41.82 dB	24.32 dB
10	30.78 dB	36.50 dB	35.16 dB	21.83 dB

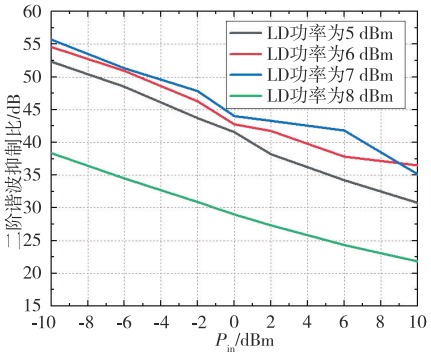

图 7　不同功率下的 2HD 对比

3　结 语

本文针对直调微波光子链路中噪声系数 NF 与二阶谐波抑制比 2HD 的制约优化问题，提出一种基于激光器偏置点动态调控的双目标优化方法。通过理论建模与实验验证，揭示了激光器输出功率对链路性能的耦合影响机制：在激光器线性工作区，通过降低偏置电流较小输出光功率可改善噪声系数，使得 NF 优化大于 2.5 dB，但会加剧二阶谐波失真，使得 2HD 恶化 2.44 dB。需通过精准偏置点选择实现性能均衡。

实验数据进一步表明，当激光器进入光饱和区时，斜率效率下降导致链路增益衰减，NF 和 2HD 同步劣化。因此，优化激光器饱和光功率提高、增加直调激光器的线性工作区是提升链路鲁棒性的关键。本方法通过动态调控偏置点，在保持链路增益稳定的前提下，为不同应用场景提供了灵活的设计自由度：例如在通信系统中优先抑制噪声（NF 优化），在雷达信号处理中侧重谐波抑制（2HD 优化）。

这些研究对未来微波光子学直调链路降低噪声系数及增大增益等性能优化具有指导意义。

参考文献：

[1] Yao J, Capmany J. Microwave photonics[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(12): 221401.

[2] Yang Y, Jin Y, Xiang X, et al. Single-photon microwave photonics[J]. Science Bulletin, 2022, 67(7): 700-706.

[3] Tao Z, Tao Y, Jin M, et al. Highly reconfigurable silicon integrated microwave photonic filter towards next-generation wireless communication [J]. Photonics Research, 2023, 11(5): 682.

[4] 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.

[5] Zhou P, Zhang R, Li N, et al. An RF-source-free reconfigurable microwave photonic radar with high-resolution and fast detection capability [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2862-2869.

[6] 吝渊博. 面向雷达应用的微波光子处理技术[J]. 电声技术, 2023,47(11):108-110.
Lin Yuanbo. Microwave photon processing technology for radar applications [J]. Audio Engineering, 2023, 47(11): 108-110.

[7] Ma C, Cao F, Yang Y, et al. Microwave photonic sparse radar with a high range resolution[J]. Proc. SPIE, 2022: 314.

[8] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2019, 13: 80-90.

[9] 王 超, 庾财斌, 肖永川, 等. 基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 902-906.
Wang Chao, Yu Caibin, Xiao Yongchuan, et al. Simulation of large-dynamic microwave photonic link based on phase modulation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 4106): 902-906.

[10] Li M, Zhu N. Recent advances in microwave photonics[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(2): 160-185.

[11] 邵光灏, 翟计全, 叶星炜, 等. 射频光传输雷达接收链路的系统优化[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 318-323.
Shao Guanghao, Zhai Jiquan, Ye Xingwei, et al. System optimization for radio-over-fiber radar receiving link [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 318-323.

[12] 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. Analysis on characteristics of phase modulated microwave optical transmission link[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 73-78.

[13] 刘可心. 基于数字信号处理的高速光子太赫兹无线通信[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Liu Kexin. High-speed photonic terahertz wireless communication assisted by digital signal processing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[14] Pei Y, Yao J, Xu K, et al. Advanced DSP technique for dynamic range improvement of a phase-modulation and coherent-detection microwave photonic link[C]// 2013 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2013: 72-75.

[15] Clark T R, Dennis M L. DSP-based highly linear microwave photonic link [C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. IEEE, 2007: 1507-1510.

[16] Rafique D, Rahman T, Napoli A, et al. Digital pre-emphasis in optical communication systems: On the nonlinear performance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 33(1): 140-150.

作者简介：

彭若雪(1998—),女,硕士研究生,主要从事微波光子、相干光通信方面的研究;

瞿鹏飞(1983—),男,博士,工程师,研究方向为微波光子学。