

# Modeling and Analysis of Large-Dynamic Range Microwave Photonic Links

Zulin Li<sup>1,2</sup>, Shengxing Yao<sup>1,2,3</sup>, Jun Hong<sup>1,2</sup>, Xiaohu Wang<sup>1,2,3</sup>, Huaqing Liu<sup>1</sup>, Lixiang Li<sup>1</sup>, Wenhua He<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang Hunan

<sup>2</sup>Hengyang Key Laboratory of Optoelectronic Information Detection and Processing, Hengyang Hunan

<sup>3</sup>Hengyang Sanlian Surveying and Mapping Services Limited, Hengyang Hunan

<sup>4</sup>Hengyang Administration of Quality and Technology Supervision, Hengyang Hunan

Email: 13875741015@163.com

Received: Dec. 25<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jan. 13<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 16<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The three-order spurious free dynamic range of microwave optical link is theoretically modeled, and the influence of laser output power, modulator half wave voltage and bias voltage on the dynamic range is also analyzed in this paper. The results show that the large output power of laser, low bias operating voltage and moderate half wave voltage are effective ways to obtain large dynamic range.

## Keywords

Microwave Photonic Link, Spurious Free Dynamic Range, Half Wave Voltage

---

# 大动态范围微波光子链路的建模与分析

李祖林<sup>1,2</sup>, 姚胜兴<sup>1,2,3</sup>, 洪俊<sup>1,2</sup>, 王小虎<sup>1,2,3</sup>, 刘华清<sup>1</sup>, 李理想<sup>1</sup>, 贺文华<sup>4</sup>

<sup>1</sup>湖南工学院, 电气与信息工程学院, 湖南 衡阳

<sup>2</sup>衡阳市光电信息检测与处理重点实验室, 湖南 衡阳

<sup>3</sup>三联测绘服务有限公司, 湖南 衡阳

<sup>4</sup>衡阳市质量技术监督局, 湖南 衡阳

Email: 13875741015@163.com

收稿日期: 2016年12月25日; 录用日期: 2017年1月13日; 发布日期: 2017年1月16日

## 摘要

对微波光链路的三阶无杂散动态范围进行了理论建模,并分析了激光器输出功率、调制器的半波电压与偏置电压对动态范围大小的影响。结果表明,较大的激光器输出功率、调制器的低偏置工作电压与适中的半波电压是获取大动态范围的有效方式。

## 关键词

微波光子链路, 无杂散动态范围, 半波电压

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波光链路本身具有以下优点:体积小、抗电磁干扰能力强、损耗小、低色散以及带宽大等,因而广泛地被用于民用和军用领域,比如军用的雷达以及电子战领域等,民用的有线电视和无线电信领域等。其基本原理在于:输入端微波信号对光强度进行调制,已调光信号通过光纤传送到接收端,然后通过光电探测器进行平方律检波还原该微波信号[1] [2] [3] [4]。

微波光链路作为微波信号的传输媒质时,当输入信号足够小,系统噪底将其淹没,使得接收端无法检测到信号;当输入信号足够大时,系统的非线性将使之畸变,严重影响接收信号的正确性。非线性受限的输入信号最大值与噪底受限的输入信号最小值之比即所谓的动态范围 SFDR,一般以 dB 为单位。无杂散动态范围是作为衡量微波光链路其性能好坏的主要指标[5] [6] [7] [8]。

本文首先对微波光链路的三阶无杂散动态范围进行建模,然后分析了激光器输出功率、电光调制器的半波电压以及其偏置工作电压对链路动态范围的影响,为大动态微波光链路的设计提供了较好的理论支持与优化方案。

## 2. 理论建模

强度调制-直接解调型微波光链路通常是由一个激光器、一个电光调制器、光纤与一个光电探测器等器件组成,如图 1 所示。输入的射频电信号通过调制器后转变成光信号,光信号在经过光纤传输后到达接收单元,接着光信号又通过探测器还原成电信号[9] [10]。

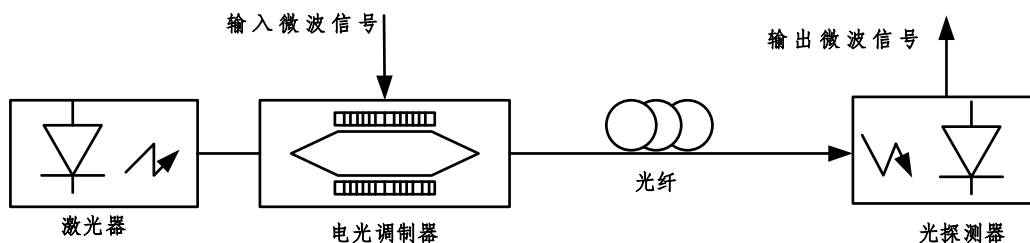


Figure 1. Typical microwave photonic link topology

图 1. 典型微波光子链路拓扑

设由激光器输出的微波光信号  $V(t) = V_{MW} \sin(\omega t)$ ，其中  $V_{MW}$  表示的是微波输入信号的幅值。直流偏置相移  $\phi_b = \pi V_b / V_\pi$ ，微波相移幅值  $\phi_{MW} = \pi V_{MW} / V_\pi$ ，其中  $V_b$  表示的是调制器的偏置电压， $V_\pi$  表示的是调制器的半波电压。MZM 调制器的输出光功率表示如下：

$$P_m = \frac{1}{2} \alpha P_0 \left[ 1 + \zeta \cos \left( \frac{\pi}{V_\pi} V_m \right) \right] \quad (1)$$

其中  $\alpha$  表示的是 MZM 调制器的损耗系数， $P_0$  表示的是输入的光功率， $\zeta$  表示的是系统的消光比系数，在课题中  $\zeta$  的值取 1， $V_m$  表示的是调制器的电输入端的输入电压，它包含有直流部分以及微波部分。将公式(1)利用贝塞尔函数展开以后可以得到如下的公式：

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{1}{2} \alpha P_0 \left[ 1 + \zeta \cos \left( \frac{\pi}{V_\pi} V_m \right) \right] = \frac{1}{2} \alpha P_0 \left[ 1 + \cos(\phi_b + \phi_{MW} \sin(\omega t)) \right] \\ &= \frac{1}{2} \alpha P_0 \left[ 1 + J_0(\phi_{MW}) \cos(\phi_b) \right] - \alpha P_0 \sin(\phi_b) \cdot \sum_0^{+\infty} J_{2n+1}(\phi_{MW}) \sin((2n+1)\omega t) \\ &\quad + \alpha P_0 \cos(\phi_b) \cdot \sum_1^{+\infty} J_{2n}(\phi_{MW}) \cos(2n\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

将探测器视作线性的，可以将输出的信号与各阶交调失真分量表示为：

$$P'_{n\omega} \approx \frac{1}{2} \left( \rho \alpha p_0 \cos \left( \phi_b + \frac{n\pi}{2} \right) J_n(\phi_{MW}) \right)^2 Z_L \quad (3)$$

系统的增益可以表示为：

$$G_F = \left( I_{dc} \sin(\phi_b) \frac{\pi}{2V_\pi} \right)^2 Z_L Z_{in} \quad (4)$$

其中， $I_{dc}$  表示的是探测器的平均光电流，它的表达式为：

$$I_{dc} = \frac{1}{2} \alpha \rho p_0 (1 + \cos \phi_b) \quad (5)$$

三阶截断点的输出功率(OIP<sub>3</sub>)为：

$$\text{OIP}_3 = (p_\omega)^3 / (p_{3\omega})^2 \quad (6)$$

在小信号模型下时，有  $V_{MW} \ll V_\pi$ ，这是可以利用  $J_n(\phi_{MW}) \approx (\phi_{MW})^n / (2^n n!)$  将公式(3)化简，得到：

$$\begin{cases} P_\omega \approx \frac{1}{2} \left( \rho \alpha p_0 \cos \left( \phi_b + \frac{\pi}{2} \right) J_1(\phi_{MW}) \right)^2 Z_L \\ P_{3\omega} \approx \frac{1}{2} \left( \rho \alpha p_0 \cos \left( \phi_b + \frac{3\pi}{2} \right) J_3(\phi_{MW}) \right)^2 Z_L \end{cases} \quad (7)$$

输出阻抗  $Z_L$  取 50  $\Omega$  后再将公式(7)代入公式(6)可以得到：

$$\text{OIP}_3 = 6 \times (5 \rho \alpha p_0)^2 \frac{\cos^3 \left( \phi_b + \frac{\pi}{2} \right)}{\cos \left( \phi_b + \frac{3\pi}{2} \right)} \quad (8)$$

此时的链路中的噪声基底表示为：

$$N_{\text{out}} = N_{\text{th}} + N_{\text{shot}} + N_{\text{RIN}} \quad (9)$$

根据上面的几个公式最终可以推出：

$$N_{\text{OUT}} = 6.384 \times 10^{-20} P_0^2 (1 + \cos \phi_b)^2 \sin^2 \phi_b + 4.14 \times 10^{-21} + 6.4 \times 10^{-18} P_0 (1 + \cos \phi_b) + 8 \times 10^{-17} P_0^2 (1 + \cos \phi_b)^2 \quad (10)$$

链路的无杂散动态范围可以表示为：

$$\text{SFDR}_3 = \left( \frac{\text{OIP}_3}{N_{\text{out}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

由公式(8)与公式(10)可以得到 $\text{SFDR}_3$ 最终的表达式。

### 3. 仿真与讨论

基于上文得出的理论模型，本章将分析微波光链路的输入光功率 $P_0$ 、直流偏置电压 $V_b$ 以及半波电压 $V_\pi$ 对无杂散动态范围 $\text{SFDR}_3$ 的影响。

#### 3.1. 输入光功率对 $\text{SFDR}_3$ 的影响

根据商用器件实际指标，设调制器的损耗系数 $\alpha$ 为0.8，半波电压设置为4V，激光器相对强度噪声 $\text{RIN}$ 取 $10^{-16}$ ，直流偏置电压分别取 $V_{b1} = 1\text{V}$ 、 $V_{b2} = 2\text{V}$ 、 $V_{b3} = 3\text{V}$ ， $P_0$ 的取值范围取的是0W到1W，输入光功率对无杂散动态范围 $\text{SFDR}_3$ 的影响如图2所示。由图不难看出，在不同的偏置电压下，随着激光器输出功率的增加，动态范围也随着增大，最终趋向饱和。 $V_{b2} = 2\text{V}$ 时，动态范围的达到饱和的趋势要明显早于其它偏置点，说明了偏置点越靠近正交工作点，动态范围随着光功率的增加越容易达到饱和。

将直流偏置点设置为2V，即正交工作点，改变调制器半波电压，分别设为 $V_{\pi1} = 2.7\text{V}$ 、 $V_{\pi2} = 4\text{V}$ 与 $V_{\pi3} = 8\text{V}$ ，输入光功率对无杂散动态范围 $\text{SFDR}_3$ 的影响如图3所示。由图不难看出，从总体趋势来看，调制器半波电压对动态范围的影响与偏置电压一致。 $V_{\pi1} = 2.7\text{V}$ 时微波光链路的动态范围最大，这是因为调制器工作在低偏置点，链路的噪声较少。 $V_{\pi2} = 4\text{V}$ 时，随着光功率的增加，动态范围最先达到饱和，这是因为此时调制器工作在正交工作点。

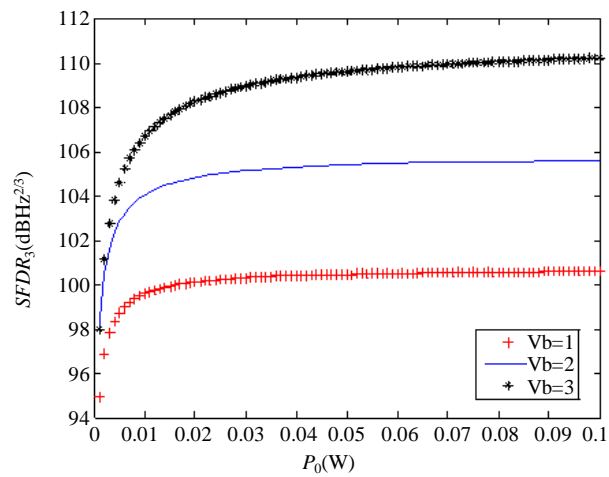
#### 3.2. 直流偏置电压对 $\text{SFDR}_3$ 的影响

如上文所述，根据商用器件实际指标，设调制器的损耗系数 $\alpha$ 为0.8，半波电压设置为2.5V，激光器相对强度噪声 $\text{RIN}$ 取 $10^{-16}$ ，输入功率 $P_0$ 取的三个数值分别为 $P_{01} = 0.0001\text{W}$ 、 $P_{02} = 0.001\text{W}$ 与 $P_{03} = 0.1\text{W}$ ， $V_b$ 的取值范围取的是5V到7.5V时直流偏置电压对 $\text{SFDR}_3$ 的影响如图4所示。由图不难看出，整体而言，激光器输出功率越大动态范围越大；随着偏置电压的增加， $\text{SFDR}_3$ 的取值呈现先增加后降低的趋势。

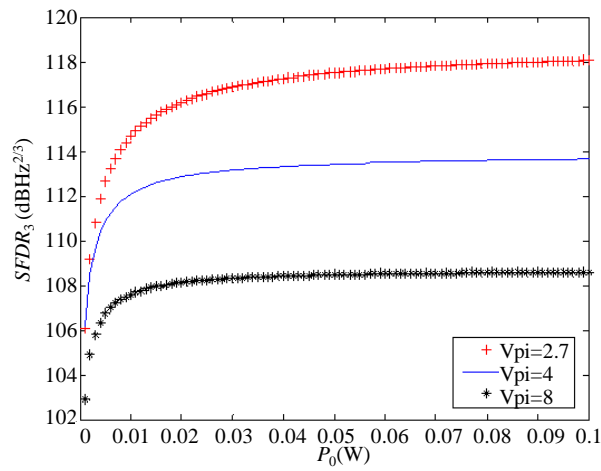
同样的，将半波电压分别取 $V_{\pi1} = 2.5\text{V}$ 、 $V_{\pi2} = 5\text{V}$ 与 $V_{\pi3} = 7.5\text{V}$ ， $V_b$ 的取值范围是5V到7.5V， $P_0$ 设为0.01W时偏置电压对 $\text{SFDR}_3$ 的影响如图5所示。由图所示，仅当 $V_{\pi1} = 2.5\text{V}$ 时动态范围呈现先增加后降低的趋势，这是因为当 $V_b$ 的取值范围在5V到7.5V时可以覆盖一个半波电压周期。

#### 3.3. 半波电压对 $\text{SFDR}_3$ 的影响

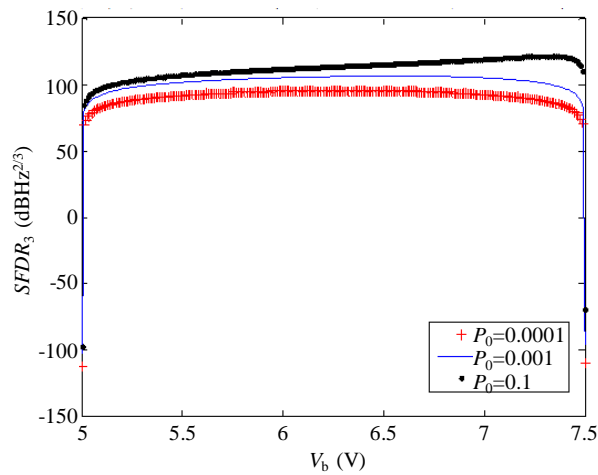
如上文所述，根据商用器件实际指标，设调制器的损耗系数 $\alpha$ 为0.8，激光器相对强度噪声 $\text{RIN}$ 取 $10^{-16}$ ，输入功率 $P_0$ 取的三个数值分别为 $P_{01} = 0.0001\text{W}$ 、 $P_{02} = 0.001\text{W}$ 与 $P_{03} = 0.1\text{W}$ ， $V_b$ 为2V时 $V_\pi$ 的取值(2.1V~8V)对 $\text{SFDR}_3$ 的影响如图6所示。总体而言，随着半波电压的增加动态范围呈现先增加后减



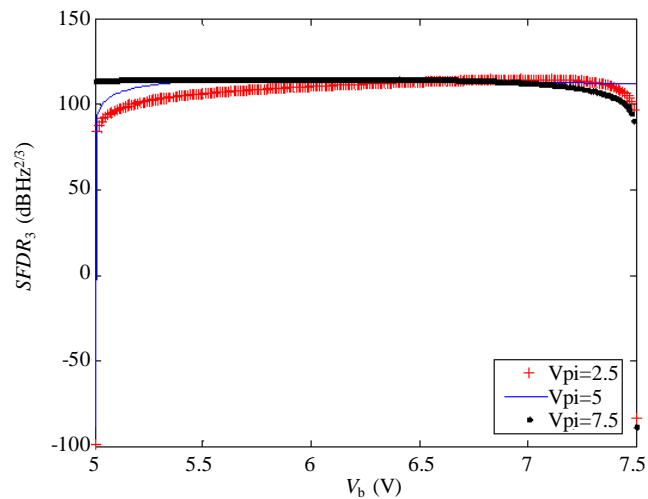
**Figure 2.** Effect of  $P_0$  on  $SFDR_3$  under different DC bias voltage  
**图 2.** 不同直流偏置电压下  $P_0$  对  $SFDR_3$  的影响



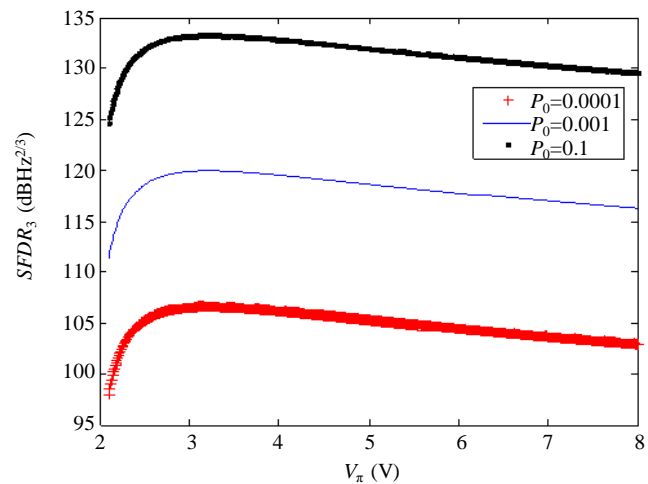
**Figure 3.** Effect of  $P_0$  on  $SFDR_3$  under different half wave voltage  
**图 3.** 不同半波电压下  $P_0$  对  $SFDR_3$  的影响



**Figure 4.** Effect of  $V_b$  on  $SFDR_3$  under different optical power  
**图 4.** 不同光功率下  $V_b$  对  $SFDR_3$  的影响



**Figure 5.** Effect of  $V_b$  on  $SFDR_3$  under different half wave voltage  
**图 5.** 不同半波电压下  $V_b$  对  $SFDR_3$  的影响



**Figure 6.** Effects of different light power  $V_\pi$  of  $SFDR_3$   
**图 6.** 不同光功率下  $V_\pi$  对  $SFDR_3$  的影响

小的趋势；光功率大对应的动态范围也越大，与上文的分析吻合。同理，结合图 5 与图 6 很容易得出不同偏置电压下  $V_\pi$  的取值(2.1 V~8 V)对  $SFDR_3$  的影响，这里不再叙述。

#### 4. 总结

本文对微波光链路的三阶无杂散动态范围进行建模，并分析了激光器输出功率、电光调制器的半波电压以及其偏置工作电压对链路动态范围的影响，结果表明：一定程度地增大激光功率，让调制器工作在低偏置点，合适地选择调制器的半波电压是优化微波光链路动态范围的有效方式，最终将微波光链路的  $SFDR_3$  值提高到接近  $135 \text{ dBHz}^{2/3}$ 。

#### 基金项目

湖南省教育厅科研重点项目(15A046, 16A054)、衡阳市科技计划衡阳市产学研项目(2015kc10)与湖南省大学生创新项目课题资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 周东旺, 李舜酩, 江星星, 等. 基于传递函数估计的近场声全息的噪声源识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2874-2880.
- [2] Levy, E., Horowitz, M., Okusaga, O., *et al.* (2009) Study of Dual-Loop Optoelectronic Oscillators. *IEEE International Frequency Control Symposium*, Besancon, 20-24 April 2009, 505-507. <https://doi.org/10.1109/freq.2009.5168231>
- [3] Lance, A., Wendell, D.S. and Labaar, F. (1984) Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain. *Infrared and Millimeter Waves*, **11**, 239-289.
- [4] Rubiola, E., Salik, E., Huang, S.H., *et al.* (2005) Photonic-Delay Technique for Phase-Noise Measurement of Microwave Oscillators. *Journal of the Optical Society of America B*, **22**, 987-996. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.000987>
- [5] Zhou, W.M. and Blasche, G. (2005) Injection-Locked Dual Opto-Electronic Oscillator with Ultra-Low Phase Noise and Ultra-Low Spurious Level. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **53**, 79-84.
- [6] Hong, J., Yao, S.X., Li, Z.L., *et al.* (2013) Fiber-Length Dependence Phase Noise of Injection-Locked Optoelectronic Oscillator. *Microwave and Optical Technology Letters*, **55**, 2568-2571. <https://doi.org/10.1002/mop.27853>
- [7] Rubiola, E. (2009) *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillator*. Cambridge University Press, New York.
- [8] Hong, J., Liu, A.M. and Guo, J. (2013) Study on Low-Phase-Noise Opto-Electronic Oscillator and High-Sensitivity Phase Noise Measurement System. *Journal of the Optical Society of America A*, **30**, 1557-1562. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.30.001557>
- [9] Hong, J., Liu, A., Wang, X.H., *et al.* (2015) New Kind of Injection-Locked Oscillator and Its Corresponding Long-Term Stability Control. *Applied Optics*, **54**, 8187-8191. <https://doi.org/10.1364/AO.54.008187>
- [10] Hong, J., Yao, S.X., Li, Z.L., *et al.* (2014) The Effect of Flicker Noise on the Phase Noise of Opto-Electronic Oscillator. *International Journal for Light and Electron Optics*, **125**, 1572-1574. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.09.006>

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)