

微波光链路和光电探测器残余相位噪声的测量

曹哲玮, 杨 春

(东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210018)

摘要: 提出了一种测量长光纤微波光链路以及链路中某一器件残余相位噪声的方法。与以前传统的残余相位噪声测量方法相比, 新提出的基于互相关的双音法抑制了不相关噪声源引入的噪声, 而保留了待测器件的噪声。通过这种方法, 测量了外调制长光纤微波光链路的残余相位噪声, 一个 6 km 微波光纤链路的残余相位噪声在 1 kHz 频偏处被测得为 -130 dBc/Hz, 在 10 kHz 频偏处被测得为 -140 dBc/Hz, 相较于光纤长度为 1 m 的短微波光链路, 残余相位噪声恶化了接近 10 dB。另外, 为了找出光电探测器的残余相位噪声与其非线性引起的射频功率压缩度之间的关系, 还用这种方法测量了工作在不同条件下的光电探测器的残余相位噪声, 实验结果表明: 光电探测器的非线性会恶化它的残余相位噪声。

关键词: 残余相位噪声; 测量; 微波光链路; 双音; 互相关; 光电探测器

中图分类号: TN201; TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0717006

Residual phase noise measurements of microwave optical links and photo-electric detector

Cao Zhewei, Yang Chun

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: A method for measuring the residual phase noise (RPN) of long microwave optical links (MOLs) and individual components in the MOL was proposed in this paper. Compared with the previous RPN measurement methods, the two-tone correlation-based method suppressed the noise contributions of the uncorrelated noise sources except that of the device under test (DUT). By this method, the RPN of externally modulated long MOLs was measured, the RPN of a 6 km MOL was successfully measured to be -130 dBc/Hz at 1 kHz offset and -140 dBc/Hz at 10 kHz offset, compared with a 1 m short MOL, the RPN deteriorated about 10 dB. In addition, in order to find out the relationship between the RPN and the RF power compression due to the nonlinearity of the photo-electric detector (PD), the RPNs of the PD with different incident optical powers and bias voltages were also measured by this method. The experimental results reveal that the nonlinearity of PD can deteriorate its RPN.

Key words: residual phase noise; measurement; microwave optical link; two-tone; correlation; photo-electric detector

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国防重点项目

作者简介: 曹哲玮(1988-), 男, 博士生, 主要从事微波光子学方面的研究。Email: 230139115@seu.edu.cn

导师简介: 杨春(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微波光子学方面的研究。Email: yangchun_seu@163.com

0 引言

微波光纤链路(MOL)在远距离微波信号传输中有着诸多优势,比如低损耗、大带宽、防电磁干扰、重量轻等^[1-2],广泛应用于雷达、电子战和无线通信中。然而,许多应用都需求低残余相位噪声(RPN)的MOL。目前,已经有许多方法可以测量MOL的RPN,实验结果证明外调制MOL有着非常低的RPN^[3-4]。为了降低测量系统的噪底,载波抑制法和一些基于互相关的方法已经被研究出来^[5-11],但是所有这些方法只适用于测量短光纤(光纤长度小于1 km)情况下的MOL,而对于长光纤MOL,测量系统噪底中由微波参考源引入的噪声会随着待测件(DUT)延时的增加而显著增加,因而会恶化噪底。文中提出了一种双音互相关方法来测量大延时链路或器件的RPN,这种方法通过对两个不同频率的微波参考源进行互相关处理来抑制由参考源引入的不相关的噪声,从而降低噪底。实验中用双音法测量了不同长度光纤的外调制MOLs的RPN。同时,链路尾端光电探测器(PD)的非线性对整个链路性能的优劣起着至关重要的作用,在较大的入射光功率或较低的反向偏压条件下,PD的响应都会呈现出非线性,一些低频噪声会由于非线性上变频到载波附近,进而恶化载波附近的相噪。为了研究PD的RPN,实验中用射频功率压缩度来表征PD的非线性程度,用双音法测量了工作在不同非线性状态下的PD的RPN,实验结果表明光纤长度以及PD的非线性都会对MOL的RPN产生影响。

1 理论

传统的RPN测量方法是一种由双平衡混频器构成的干涉仪法^[6-8],如图1(a)所示,M:混频器,PS:移相器,LPF:低通滤波器,DUT:待测件,A:放大器。

混频器工作在正交状态,微波参考源提供的载波会在混频器输出端抵消。如果干涉仪的两臂延时相同,由参考源引入到两臂中的相位噪声也会在混频器输出端相干抵消。然而,如果当DUT臂的延时远大于另一臂时,由参考源引入到两臂中的相位噪声在到达混频器输入端时是部分相干的,因而在混频器输出端只会被抵消一部分。对于大延时的DUT,

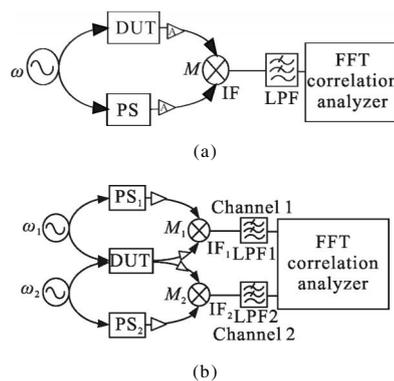


图 1 传统方法和双音法测量 RPN 的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the conventional and two-tone method for measuring RPN

比如长光纤MOL,参考源引入的残留在混频器输出信号中的相位噪声可以借助一个传递函数 $H_{\phi}(f)$ 来计算^[7]:

$$S_{\phi_r}(f) = |H_{\phi}(f)|^2 S_{\phi_{bs}}(f) = 4\sin^2(\pi f \tau) S_{\phi_{bs}}(f) \quad (1)$$

式中: $S_{\phi_{bs}}(f)$ 为参考源的相位噪声; τ 为两臂的延时差; f 为频偏。

当测量具有大延时的长光纤MOL的RPN时,参考源引入到测量系统中的相位噪声是显著的。如果 $f\tau$ 比 $1/\pi$ 小得多,则 $H_{\phi}(f)$ 是线性的,这就是可以用传统方法测量短光纤MOL的RPN的原因。当光纤长度加倍时, $H_{\phi}(f)$ 会提高6 dB。对于一个光纤长度为3 km的MOL,参考源引入的相位噪声在1 kHz,10 kHz和30 kHz频偏处的抑制度分别只有-20 dB,-1 dB和6 dB。对于更长光纤的MOL,参考源引入相噪的抑制度更小。因此,如果要准确地测量长延时DUT的RPN,必须要抑制掉参考源引入的相位噪声。

文中所提出的RPN测量系统原理图如图1(b)所示。与传统的单音法相比,双音法将两个互相独立的微波源(即参考源)一起输入到DUT中,这两个微波源频率差为 $\Delta\omega$ 。DUT的输出信号分别与每个微波源进行混频,每个混频器输出的零中频(IF_{1,2})信号中都携带着DUT的RPN以及对应微波源引入的相位噪声。

IF_{1,2}的功率谱由FFT互相关分析仪所测得,FFT互相关分析仪再将这两个谱进行互相关来抑制不相关的噪声(微波源和放大器引入的噪声),保留相关的噪声(DUT的RPN)。两个互相独立的微波源可写成:

$$V_{s,i} = V_{a,i} \sin[\omega_i t + \phi_i(t)], i=1,2 \quad (2)$$

式中： ω_i 和 ϕ_i 分别是第 i 个微波源的角频率和相位噪声。

DUT 的输出可表示为：

$$V_D = G \sum_{i=1}^2 V_{a,i} \sin[\omega_i(t-\tau_D) + \phi_i(t-\tau_D) + \phi_D(t)] \quad (3)$$

式中： G 为总增益； τ_d 为两臂延时差； ϕ_D 为 DUT 的 RPN。假设两个混频器都处于正交工作状态，那么 IF_1 可表示为：

$$\begin{aligned} V_{IF,1} = & k_{\phi,1} \sin[\phi_1(t) - \phi_1(t-\tau_D) - \phi_D(t)] + \\ & k_{\phi,1} \sin[2\omega_1 t + \phi_1(t) + \phi_1(t-\tau_D) + \phi_D(t)] + \\ & k_{\phi,1} \sin[\Delta\omega t + \phi_1(t) - \phi_2(t-\tau_D) - \phi_D(t)] + \\ & k_{\phi,1} \sin[(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1(t) + \phi_2(t-\tau_D) + \phi_D(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $k_{\phi,1}$ 是 M_1 的相位-电压转换增益，可由实验方法测得。可以看到在公式(4)中只有第一项能通过低通滤波器。令 $a(t) = [\phi_1(t) - \phi_1(t-\tau_D)] - \phi_D(t)$ ，其中 $[\phi_1(t) - \phi_1(t-\tau_D)]$ 是微波源引入的相位噪声。同理，从 IF_2 中可以得到 $b(t) = [\phi_2(t) - \phi_2(t-\tau_D)] - \phi_D(t)$ ，则互谱 $S_{ab}(f)$ 可表示为^[14]：

$$S_{ab}(f) = A(f)B^*(f) \quad (5)$$

式中： $A(f)$ 和 $B(f)$ 分别为 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的傅里叶变换。当处理离散信号时，经过一些数学推导，公式(5)可写成：

$$\begin{aligned} \langle S_{ab}(f) \rangle_N = & \frac{1}{T} [\langle \Phi_D \Phi_D^* \rangle_N + \langle \Phi_1 \Phi_1^* \rangle_N + \langle \Phi_2 \Phi_2^* \rangle_N + \\ & \langle \Phi_1 \Phi_2^* \rangle_N] = S_D + (1/\sqrt{N}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： T 为测量时间； Φ_D 为 ϕ_D 的傅里叶变换； S_D 为 DUT 的 RPN； Φ_1 为 $[\phi_1(t) - \phi_1(t-\tau_D)]$ 的傅里叶变换； Φ_2 为 $[\phi_2(t) - \phi_2(t-\tau_D)]$ 的傅里叶变换； (\cdot) 表示同阶。公式(6)说明双音法可以抑制微波参考源引入的噪声，因为它们是不相关的，而 DUT 的 RPN 被保留下来。理论上，在测量中通过取 N 次平均，微波参考源引入的相位噪声将被抑制 $1/\sqrt{N}$ ^[14]。

2 实验与讨论

2.1 测量 MOL 的 RPN

双音法测量 MOL 的 RPN 的实验装置根据图 1(b) 搭建。两个互相独立的微波源频率分别为 9.5 GHz 和 9.6 GHz，MOL 由一个 1 550 nm 的 DFB 激光器、一个马赫-曾德强度调制器、一个光电探测器和单模光纤

构成。分别测量了光纤长度为 1 m、2 km 和 6 km 的 MOL。低通滤波器的截止频率为 50 MHz，使用的 FFT 互相关分析仪是 Agilent 35670A，用双音法测量的 MOL 单通道 RPN、互谱 RPN 和系统噪声底，光纤长度为 6 km，载波频率为 9.5 GHz，图 2 是 6 km MOL 的 RPN 测量结果。

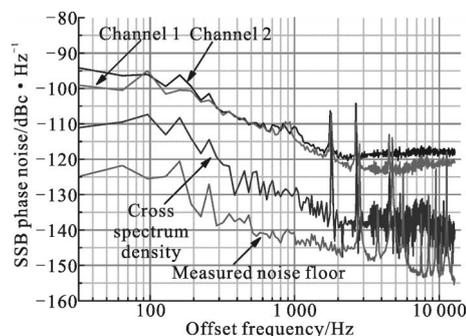


图 2 6 km MOL 的 RPN 测量结果

Fig.2 RPN measurement results of 6 km MOL

图 2 是 6 km MOL 的 RPN 测量结果。测量系统的噪声底是用微波电缆代替 DUT 测得的，噪声底在 1 kHz 频偏处为 -142 dBc/Hz，在 10 kHz 频偏处为 -152 dBc/Hz。Agilent 35670A 通道 1 测量的是载波频率为 ω_1 (9.5 GHz) 时 MOL 的 RPN，通道 2 测量的是载波频率为 ω_2 (9.6 GHz) 时 MOL 的 RPN，从图 3 中可以看出这两个通道测得 RPN 非常接近。互谱 RPN 是两个单通道谱互相关 550 次后的测量结果，它与单通道 RPN 相比，在 100 Hz 频偏以内低了接近 11 dB，在 1 kHz 频偏以外低了接近 13.7 dB。在大于 1 kHz 频偏处的噪声抑制度与理论预测是相符的 ($5\log N = 13.7$ dB, $N = 550$)，因为这个频率范围内的谱

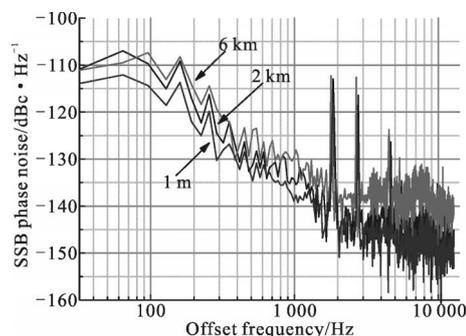


图 3 用双音法测量的 MOL 的互谱 RPN，光纤长度分别为 1 m、2 km 和 6 km，载波频率为 9.5 GHz

Fig.3 Cross-correlated residual SSB phase noise of MOL at 9.5 GHz with 1 m, 2 km and 6 km fiber measured respectively by the system based on the two-tone method

是平坦的,此处两个通道的噪声属于白相噪且是完全不相关的。在 100 Hz 频偏范围内的噪声抑制制度略小,这可能是由于两个通道的近载频相噪是部分相关的。

图 3 是不同光纤长度下 MOL 的 RPN 测量结果。可以看到,当光纤长度从 1 m 增加到 6 km,RPN 恶化了接近 10 dB。这是由于光纤色散导致光载波与光边带在到达探测器输入端时延时不同导致它们相位部分不相关^[12]。

2.2 测量 PD 的 RPN

双音法测量 PD 的 RPN 的实验装置同样根据图 1(b)搭建。图 4 是 PD 在不同射频功率压缩度情况下的互谱 RPN 测量结果。表 1 给出了射频功率压缩度与输入光功率、光电流的相互关系。

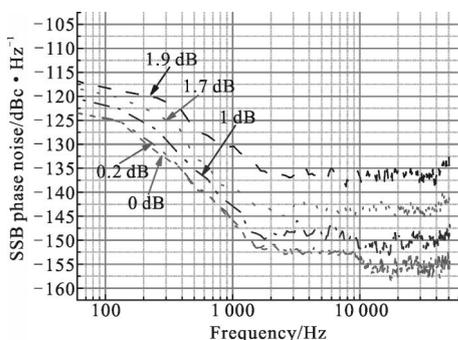


图 4 PD 在不同射频功率压缩度情况下的互谱 RPN

Fig.4 Cross-correlated RPN measurements as a function of RF compression

表 1 射频功率压缩度与输入光功率、光电流的相互关系

Tab.1 RF compression, total incident optical power and photocurrents

| RF compression/dB | 0 | 0.2 | 1 | 1.7 | 1.9 |
|-------------------|-----|------|------|------|------|
| Optical power/mW | 10 | 25 | 29.6 | 33.6 | 34.7 |
| Photocurrent/mA | 7.2 | 17.6 | 19.1 | 20 | 20.1 |

从图 4 和表 1 中可以看到,保持 PD 的反向偏压为 4.5 V 不变,当输入光功率为 10 mW 和 25 mW 时,对应的射频功率压缩度为 0 dB 和 0.2 dB,此时 PD 的 RPN 相差无几,因为 PD 工作在线性区,射频增益没有被压缩,当输入光功率继续增大时,PD 会趋于饱和。当输入光功率达到 29.6 mW 时,射频功率压缩度为 1 dB,PD 的 RPN 较其在线性区时的 RPN 恶化了接近 5 dB。当射频功率压缩度为 1.7 dB 时,

RPN 恶化的更加明显。当输入光功率达到 34.7 mW 时,对应射频功率压缩度 1.9 dB,RPN 在 1 kHz 频偏处较线性区恶化了将近 15 dB。图 5 是在三种频偏处的 RPN 与射频功率压缩度的关系。

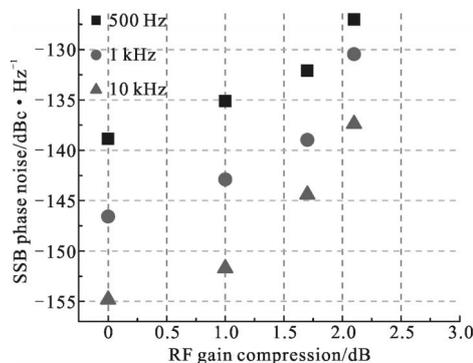


图 5 在频偏分别为 500 Hz、1 kHz 和 10 kHz 处的 RPN 与射频功率压缩度的关系

Fig.5 Relationship between the RF gain compression and the RPN at 500 Hz, 1 kHz and 10 kHz offset frequencies respectively

图 6 是当反偏电压从 2 V 增加到 9 V 的过程中,PD 的 RPN 变化情况,其中输入光功率保持在 28 mW。随着 PD 偏压的增加,PD 的 RPN 呈下降趋势。在偏压为 9 V 时的 RPN 比在 2 V 时的 RPN 低了将近 12 dB。笔者测量了在不同偏压下,PD 的射频功率压缩情况,发现当偏压为 9 V 时,射频功率压缩度为 0 dB,而当偏压为 2 V 时,射频功率压缩度为 2 dB。由于射频功率压缩是衡量 PD 非线性性的参数,因此 PD 的非线性与它的偏压有关。

综上,射频功率压缩度的增加导致了 PD 的 RPN 上升,当 PD 处于非线性区时较其在线性区时的 RPN 差得多。

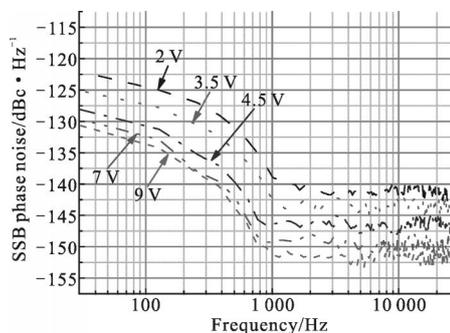


图 6 PD 在反偏电压为 2 V、3.5 V、4.5 V、7 V 和 9 V 时的互谱 RPN
Fig.6 Cross-correlated residual SSB phase noise of the PD with the bias voltage 2 V, 3.5 V, 4.5 V, 7 V and 9 V

3 结 论

用双音法测量了 MOL 和 PD 的 RPN。利用这种双音互相关的方法,有效地解决了当 DUT 延时过大(例如长光纤 MOL)时,参考源引入的相位噪声在混频器输出端不能被充分抑制的难题。通过对测量 RPN 时的双音信号进行互相关处理后,大于 1 kHz 频偏处(白相噪)的不相干噪声抑制制度为 13.7 dB,和理论预测相符。小于 1 kHz 频偏处(近载频)的相噪抑制制度较差,这是由于两个通道的近载频相噪部分相关。随着光纤长度的增加,MOL 的 RPN 会因为光纤色散的影响呈上升趋势。另外,还用双音法测量了工作在不同状态下的 PD 的 RPN,用射频功率压缩度来表征 PD 非线性程度,实验结果表明 PD 的非线性会恶化它的 RPN,造成这种现象的理论机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Capmany J, Ortega B, Pastor D, et al. Discrete-time optical processing of microwave signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(2): 702.
- [2] Cox III C H, Ackerman E I, Betts G, et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2006, 54(2): 906–920.
- [3] Matthews P J, Esman R D. Intrinsic microwave phase noise of fiber-optic links [C]//Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International, 1998, 3: 1517–1520.
- [4] Newberg I L, Gee C M, Thurmond G D, et al. Fiber optic delay lines for radar applications [C]//OE/Fiber LASE'88. International Society for Optics and Photonics, 1988: 130–134.
- [5] Li J, Ferre-Pikal E, Nelson C, et al. Review of PM and AM noise measurement systems [C]//IEEE Frequency Control Symposium, 1998: 197–200.
- [6] Wang Chong, Lu Sen. Research on additional phase noise measurement [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2014, 41(4): 44–47. (in Chinese)
王崇, 鹿森. 附加相位噪声测试技术研究 [J]. 计量与测试技术, 2014, 41(4): 44–47.
- [7] Rubiola E, Salik E, Huang S, et al. Photonic-delay technique for phase-noise measurement of microwave oscillators [J]. *JOSA B*, 2005, 22(5): 987–997.
- [8] Walls F L. Suppressed carrier based PM and AM noise measurement techniques [C]//Proceedings of the 1997 IEEE International, 1997: 485–492.
- [9] Rubiola E, Giordano V. Dual carrier suppression interferometer for measurement of phase noise [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(25): 2073–2075.
- [10] Rubiola E, Giordano V, Gros Lambert J. Improved interferometric method to measure near-carrier AM and PM noise [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 1999, 48(2): 642–646.
- [11] Rubiola E, Vernotte F. The cross-spectrum experimental method[J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2010, 1003: 0113.
- [12] Gliese U, Norskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 1996, 44(10): 1716–1724.