光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024071601

振动下微波光收发链路附加相位噪声研究

刘　婷*，汤振华，王茂旭，瞿鹏飞，肖永川，刘绍殿
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对强烈振动环境下微波光传输链路的附加相位噪声严重恶化的问题，文章分析了光链路在振动环境中附加相噪恶化原因，并研究机械振动传递机理，建立了数学仿真模型。通过仿真与实验，得到光链路系统的加速度敏感度在低频和高频范围内分别为 10^{-12} 和 10^{-11} 量级。实验结果表明，在强振动环境中，光链路系统附加相位噪声恶化 40 dBc/Hz 左右，特别是在共振处，附加相噪恶化加剧至 48 dBc/Hz 左右。通过减小光链路系统加速度敏感度，避免共振等措施，能有效减弱振动对系统附加相位噪声的影响。

关键词： 随机振动；附加相位噪声；加速度敏感度；加速度功率谱
中图分类号： TN015　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0986－04

Analysis of Additional Phase Noise of Microwave Optical Transceiver Link under Vibration Perturbation

LIU Ting, TANG Zhenhua, WANG Maoxu, QU Pengfei, XIAO Yongchuan, LIU Shaodian
(Chongqing Optoelectronics Technology Institute, Chongqing, 400060, CHN)

Abstract: The additional phase noise of the microwave optical transmission link seriously deteriorates in strong vibration environments. To address this limitation, firstly, the reasons for the deterioration were initially analyzed. Subsequently, the mechanism of vibration transmission was studied and a math model was established. Simulations and experimental analyses demonstrated that the acceleration sensitivity of the optical link system is on the order of 10^{-12} in the low frequency range and 10^{-11} in the high frequency range. The experimental results further show that in a strong vibration environment, the additional phase noise of the optical link system deteriorates to about 40 dBc/Hz and at resonance, to about 48 dBc/Hz. By reducing the acceleration sensitivity of the optical system and avoiding resonance, the effect of vibration on additional phase noise can be effectively reduced.

Key words: random vibration; additional phase noise; acceleration sensitivity; acceleration power spectral density

0　引言

微波光子链路与传统微波链路相比具有超宽带、强抗干扰能力以及低损耗等优势，广泛应用于通信、雷达、天线等领域，尤其适合远距离传输[1-4]。相位噪声是评价微波光收发链路性能好坏的重要指标，大量文献对引起微波光链路附加相位噪声恶化的因素进行了研究，主要包括光电探测器的非线性响应、噪声调制畸变等[5]。为优化链路附加相位噪声，可采用如掺铒光纤放大器(EDFA)等技术[6]。

然而随着应用环境日趋苛刻，链路系统不可避免会工作于强烈的振动条件下。由于空间与结构等限制，以及常见的随机振动环境具有强度高、频带范围大、随机性强等特点，整个链路系统在使用过程中

收稿日期：2024－07－16.
* 通信作者：刘　婷

不能做到完善的隔振和减振措施，导致其附加相位噪声恶化，降低系统性能[7-8]。因此，研究振动环境中光链路系统的附加相位噪声尤为重要。

本文分析了振动条件下微波光子链路的附加相位噪声来源，结合机械振动理论，建立了光链路系统附加相位噪声恶化模型。经实验验证，该模型与实验结果能够较好吻合。并提出了减小光链路系统的加速度的敏感度，避免共振等措施，能够在一定程度上减小振动对光链路系统附加相噪的恶化影响。

1　附加相位噪声来源

典型的直调微波光子链路结构如图 1 所示，主要包括一个激光器和一个探测器。

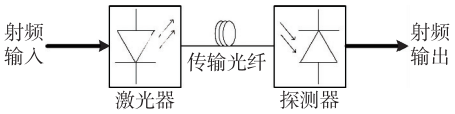


图 1　典型直调微波光子链路

在光子链路中，核心器件如激光器会产生相对强度噪声(RIN)，光电探测器会产生散粒噪声与输出热噪声。当信号源经过光子链路之后，这些噪声会导致传输的射频信号产生畸变，则根据相位噪声的定义，射频信号输出后的相位噪声可表示为[6]：

$$L(f)=\frac{P^{0}_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_{0}}+\frac{N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_{0}} \tag{1}$$

式中，$P^{0}_{\mathrm{SSB}}(f)/P_{0}$ 表示源信号的单边带相位功率谱密度，P^{0}_{SSB} 表示原始单边带噪声信号的功率谱，P_{0} 表示输入射频信号功率；$N_{\mathrm{add}}(f)/(G_{\mathrm{RF}}P_{0})$ 代表引入链路噪声之后的附加相噪，$N_{\mathrm{add}}(f)$ 表示链路的附加噪声，G_{RF} 表示链路射频增益。

则附加相位噪声，可表示为[6]：

$$L'_{0}(f)=\frac{NF\cdot kT}{P_{0}}+\frac{N_{\mathrm{f}}(f)}{P_{0}G_{\mathrm{RF}}} \tag{2}$$

式中，$NF\cdot kT/P_{0}$ 表示白噪声，NF 表示链路噪声系数，k 表示玻尔兹曼常数，T 表示绝对温度，可以通过链路的噪声系数以及输入射频功率来定量表征相位噪声的噪底；$N_{\mathrm{f}}(f)/(P_{0}G_{\mathrm{RF}})$ 表示闪烁噪声，通过光链路中激光器、探测器等有源器件的参量调制效应作用于微波信号相位噪声的近频端。

2　振动条件下附加相位噪声

在振动环境中，光收发器件会引入环境中的随机游走噪声，导致光链路系统的附加相位噪声严重恶化。光链路的信号由调频方式输出，在振动条件下，输出信号可表示为[9]：

$$V(t)=V_{0}\left\{J_{0}(\beta)\cos(2\pi f_{0}t)+\sum_{1}^{n}J_{i}(\beta)\cdot\cos[2\pi(f_{0}\pm i\cdot f)t]\right\} \tag{3}$$

式中，f_{0} 表示静态条件下链路的载波频率；f 表示振动输出频率；β 表示调制指数，其表达式为[10-11]：

$$\beta=\frac{\boldsymbol{\Gamma}\cdot\boldsymbol{A}}{f} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{\Gamma}$ 表示光链路的加速度敏感度矢量，$\boldsymbol{A}$ 表示振动的振幅。

由式(3)可知，振动引起的单边能量大小由 Bessel 函数值 $J_{n}(\beta)$ 决定，在小调制指数情况下，振动引起的附加相位为[9]：

$$L'_{v}=\left[\frac{\boldsymbol{\Gamma}\cdot\boldsymbol{A}\cdot f_{0}}{2f}\right]^{2} \tag{5}$$

在简谐振动条件下，振幅可根据实验给出，因此，光链路的加速度敏感度可表示为[12]：

$$\boldsymbol{\Gamma}=\left(\frac{2f}{\boldsymbol{A}\cdot f_{0}}\right)\times 10^{\frac{L'_{v}}{20}} \tag{6}$$

在随机振动条件下，振动振幅可由加速度功率谱 $G(f)$ 表示，式(5)可进一步表示为[10]：

$$L'_{v}(f)=\frac{(|\boldsymbol{\Gamma}|f_{0})^{2}G(f)}{2f^{2}} \tag{7}$$

根据以上分析，在振动环境中，光链路的附加相位噪声可以包含静态附加相噪和振动附加相噪[13]，即：

$$L'(f)=L'_{0}(f)+L'_{v}(f) \tag{8}$$

3　随机振动响应

在机械振动作用下，系统的振动响应可用传递函数来表示响应与激励的之间的关系。一般情况光收发链路为微阻尼系统，基于 3σ 准则，随机振动激励作用下响应加速度功率谱为[14]：

$$G_{x}(f)=3\sqrt{\frac{|H(f)|^{2}G(f)}{2\pi}} \tag{9}$$

式中，$H(f)$ 表示激励加速度与振动响应加速度之间的传递函数。

令 $T(h)=|H(f)|^{2}$ 为传递函数，则可得到[14]：

$$T(h)=\frac{1+4\xi^{2}h^{2}}{(1-h^{2})^{2}+4\xi^{2}h^{2}} \tag{10}$$

式中，ξ 表示系统阻尼比；$h=f/f_{n}$，f_{n} 表示系统固

有频率。

4 实验验证

4.1 拟合加速度敏感度

微波光收发链路的附加相位噪声与链路系统自身性能和输入条件有关，所采用的直调链路参数如表 1 所示。搭建的振动实验平台如图 2 所示，该实验平台对射频信号传输的线缆进行固定，排除振动实验中线缆对相位噪声的影响。

表 1 直调链路参数

参数	数值
输入射频功率 P_0/dBm	20
激光器功率 P_{in}/dBm	10
相对强度噪声 RIN/(dB·Hz^{-1})	−155
探测器响应度 R/(A·W^{-1})	0.8
射频频率 f/GHz	1
输入阻抗 R_{in}/Ω	50
输出阻抗 R_{out}/Ω	50

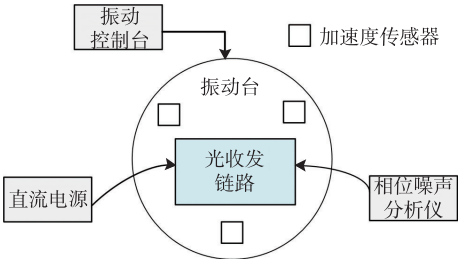


图 2 振动实验附加相位噪声测试平台框图

简谐振动条件下根据式(6)，已知输入振动条件的振幅、频率以及振动恶化的附加相位噪声便能拟合出微波光子链路的加速度敏感度。对光链路进行 8 个不同振动频率的简谐实验，并拟合出系统垂轴方向的加速度敏感度如表 2 所示。

表 2 拟合加速度敏感度

振动频率/Hz	加速度敏感度/g^{-1}
5	1.04×10^{-12}
50	4.51×10^{-12}
100	4.96×10^{-12}
200	4.56×10^{-12}
250	5.57×10^{-12}
300	6.91×10^{-12}
1 000	1.55×10^{-11}
2 000	3.57×10^{-11}

4.2 激励加速度功率谱

围绕机载平台光链路需求，根据 GJB 360-2009 方法 214 给出的随机振动条件，其加速度功率谱密度如表 3 所示，其随机振动试验谱形如图 3 所示。

表 3 随机振动激励条件

频率/Hz	加速度功率谱密度
50～100	+6 dB/oot
100～1 000	1 g^2/Hz
1 000～2 000	−6 dB/oot

注：全频段总均方根值为 7 g

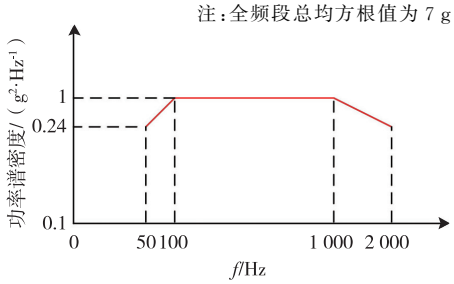


图 3 随机振动试验谱形

根据有限元仿真模态分析得出表 1 中整个直调链路的固有频率在 245.58 Hz 附近。取阻尼比 $\xi=0.05$，固有频率 $f_n=245.58$ Hz，则根据式(9)计算出系统响应加速度功率谱密度如图 4 所示。

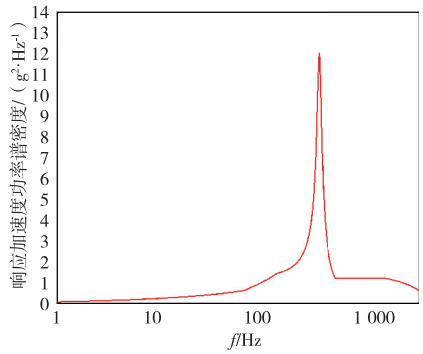


图 4 加速度响应功率谱密度

由图 3 和图 4 对比分析可知，在系统固有频率 245.58 Hz 附近，响应的加速度功率谱密度会出现峰值，其响应值是输入激励值的 12 倍左右。当振动频率与链路系统的固有频率重合时，系统会形成共振，严重恶化附加相位噪声。

4.3 仿真与实验对比分析

对表 1 和表 3 给出的直调链路系统随机振动条件进行实验分析。并将表 2 中的加速度敏感度结果代入式(7)，可计算得到链路在 8 个振动频率下的附加相位噪声。将实验结果与仿真数学模型进行对比分析，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，仿真模型与实验结果能够较好地吻合，随机振动条件下光链路的附加相位噪声会严重恶化，整体附加相位噪声抬高 40 dBc/Hz 左右。尤其是在系统固有频率 245.58 Hz 附近，系统形成

共振，附加相位噪声恶化加剧至 48 dBc/Hz 左右。

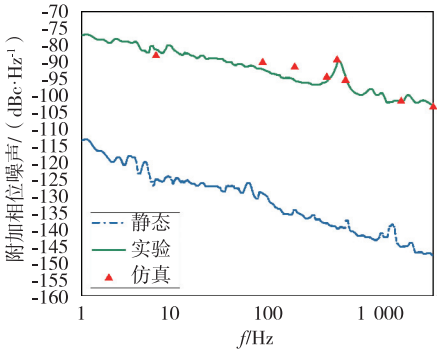


图 5　实测值与理论值对比

5　结论

为研究在恶劣的振动环境中，微波光收发链路的附加相位噪声恶化问题。本文分析了振动下光链路附加相位噪声来源，并结合振动响应激励传递机理，建立了附加相噪恶化模型。通过仿真和实验，拟合出链路系统的振动加速度敏感度，在低频范围内为 10^{-12} 量级，高频范围内为 10^{-11} 量级。实验结果证明，在强振动条件下，光链路系统的附加相位噪声恶化 40 dBc/Hz 左右，同时，在系统固有频率处发生共振，导致附加相噪进一步恶化至 48 dBc/Hz 左右。通过降低加速度敏感度，例如在链路系统表面涂上抗振材料，以避免共振及在振动传播路径中的隔振等，能够有效降低振动环境下微波光收发链路附加相位噪声的恶化。

参考文献：

[1] Yao J. Microwave Photonics [J]. Journal of Lightawve Technology, 2009, 27: 314-335.

[2] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phasenoisa reduction of an optical link and optoelectronic oscillator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456.

[3] Cox C H, Ackerman E I. Mcrowave Photonics: Past[C]// 2008 International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, 2008: 9-11.

[4] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.

[5] 尹言平. 微波光链路的相位噪声研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 114-116.
Yin Yanping. Study on phase noise of microwave optical link [J]. Laser Journal, 2015, 36(4): 114-116.

[6] 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 additional phase noise in microwave photonic links with external modulation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(4): 555-559.

[7] 王永建，赵洪林，李明江. 相位噪声对 QPSK 系统性能的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报，2010，42(1)：68-71.
Wang Yongjian, Zhao Honglin, Li Mingjiang. Effect of phase noise on the performance of QPSK system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42 (1): 68-71.

[8] Boudot R, Rubiola E. Phase noise in RF and microwave amplifiers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(12): 2613-2624.

[9] 唐　钱，纪龙蛰，单晓庆. 石英晶体振荡器加速度效应及敏感度的测试[J]. 测试技术学报，2012，26(3)：200-206.
Tang Qian, Ji Longzhe, Shan Xiaoqing. Measurement of acceleration effect and sensitivity of quartz crystal oscillator[J]. Journal of Testing Technology, 2012, 26(3): 200-206.

[10] 苏　敏，袁春花，金世超，等. 振动条件下频率源相位噪声恶化影响研究[J]. 微波学报，2017，33(3)：93-96.
Su Min, Yuan Chunhua, Jin Shichao, et al. Study on the effect of phase noise deterioration of frequency source under vibration [J]. Journal of Microwave Technology, 2017, 33(3): 93-96.

[11] 冷国俊，陈　睿，何　著，等. 晶振加速度敏感性矢量计算及耦合机理机理研究[J]. 应用数学和力学，2014，S1：65-69.
Leng Guojun, Chen Rui, He Zhu, et al. Research on crystal acceleration sensitivity vector calculation and coupling mechanism[J]. Applied Mathmatics and Mechanics, 2014, S1: 65-69.

[12] Filler R L. The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators: A review[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1988, 35(3): 297-305.

[13] 董　岫，刘　昂，张国强，等. 微波光子本振源振动响应研究[J]. 雷达系统与技术，2021，43(9)：69-72.
Dong Shen, Liu Ang, Zhang Guoqiang, et al. Research on vibration response of microwave photon local oscillator [J]. Radar System and Technology, 2021, 43(9): 69-72.

[14] 陈江攀，刘　艳，刘　艺，等. 随机振动加速度响应谱及与冲击等效性分析[J]. 装备环境工程，2024，21(1)：1-8.
Chen Jiangpan, Liu Yan, Liu Yi, et al. Random vibration acceleration response spectrum and impact equivalence analysis [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 1-8.

作者简介：

刘　婷(1995—)，女，重庆市人，硕士，工程师，主要从事微波光子学方向的研究。