光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250930002

射频光传输链路相噪分析与优化

陈信伟[1,2*]，武　麟[1,2]，王　鹏[1,2]，黄　旭[1,2]

（1. 中国电子科技集团公司第八研究所，合肥 230041；2. 安徽省光纤传感工程实验室，合肥 230041）

摘　要： 文章提出一种射频光纤传输链路相噪优化方法。首先针对射频光传输链路的强度噪声模型和相噪模型进行理论分析，并探讨利用锁相晶振对光传输链路相位噪声进行优化的噪声模型。在该理论模型基础上，利用在探测器输出端接一锁相晶振的光传输链路，测试了不同光损耗情况下射频光传输链路的相噪。实验结果表明，该方法能使锁相带宽外的射频光传输链路相噪指标提升近30 dB，并且输出信号相噪不受光传输链路插损的影响，验证了该方法在不同光损耗条件下的有效性。

关键词： 射频光纤传输；相噪；晶振；锁相

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1109－05

Analysis and Optimization of Phase Noise in Radio-Over-Fiber Links

CHEN Xinwei[1,2], WU Lin[1,2], WANG Peng[1,2], HUANG Xu[1,2]

(1. The Eighth Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230041, CHN;
2. Anhui Fiber Optic Sensing Engineering Laboratory, Hefei 230041, CHN)

Abstract: In this study, a method for optimizing phase noise in radio frequency (RF)-over-fiber transmission links was proposed. The intensity and phase noise models of an RF-over-fiber transmission link were theoretically analyzed. In addition, a noise model for optimizing the phase noise in an optical transmission link, with a phase-locked crystal oscillator, was examined. Based on this theoretical model, an optical transmission link, with a phase-locked crystal oscillator connected to the output of a detector, was employed to measure the phase noise of RF-over-fiber transmission links under different optical-loss conditions. The experimental results demonstrated that this method could improve the phase noise performance of the RF-over-fiber transmission link outside the phase-locked bandwidth by approximately 30 dB, while the output signal phase noise remained unaffected by the insertion loss of the optical transmission link.

Key words: radio over fiber; phase noise; crystal oscillator; phase locked

0　引言

低噪声、超稳频率基准信号在现代物理测量以及基础物理实验等许多领域发挥着重要作用[1]。射频光纤传输技术（Radio over Fiber，RoF）作为微波光子学领域研究的关键技术之一，兼具了光纤低损耗、大带宽的优势，以及低成本微波传输、灵活接入的特点，在超宽带无线移动通信、相控阵雷达、卫星通信以及射电天文学等众多领域都具有重要的应用价值和广阔的应用前景[2-3]。

目前，利用低成本的光纤来实现高精度频率参考信号的远程传输，为远端用户提供高度一致的参考频率已在多个行业进行应用[4]。理想的信号传输

收稿日期：2025－09－30.

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF0715700）；安徽省重点研发计划项目（2023g07020006）.

* **通信作者：**陈信伟

系统应确保信号传输过程中不附加任何的劣化，尤其对于高稳定参考信号的传输，通常要求传输系统的稳定程度达到信号稳定程度的十倍以上[5]。为实现这一目标，RoF系统必须满足严苛的技术指标要求，其中相位噪声成为评价系统性能的重要指标。相位噪声反映了系统在各种噪声作用下所表现的相位随机起伏，是评价信号频率稳定度的重要指标之一。然而，采用RoF技术进行射频信号传输的问题在于，在电光以及光电转换过程中，包括激光器、探测器以及光放大器在内的器件都会对信号附加一定的噪声，造成最终射频信号相位噪声的劣化[6]。因此，深入研究基于RoF技术的信号传输系统的相位噪声特性，对于系统设计和应用都具有重要意义。

目前，针对射频光传输链路相噪优化的方法多采用光放大器补偿法[7]。本文提出一种采用外参考注入锁定来实现射频光传输链路相噪优化的方法。首先，分析了射频光纤传输链路系统各器件噪声对链路噪声的影响关系以及关联特性。在理论分析的基础上，提出了RoF传输系统相位噪声的优化与抑制方案。为了验证该方案的有效性，利用时钟分发和时频传递中的典型的10 MHz点频信号为例进行了实验研究。实验中，利用1 km射频光纤传输链路对10 MHz信号进行了远距离传输，测试了利用锁相晶振对射频光纤传输链路相噪优化前后的射频信号相噪值。测试结果表明，采用锁相晶振对射频光纤传输链路输出信号进行优化后，可提升30 dB的相噪指标。对于宽带射频信号光传输，可采用一个宽带的锁相环来实现对宽带信号光传输的相噪优化。

1 微波光纤传输相噪理论分析

射频信号通过光纤传输，传输系统输出的信号附加相位噪声主要由光纤传输链路中的有源光器件、光纤中各类散射及非线性效应和射频放大链路的噪声引入，其中前两项占主要因素。

1.1 传输链路主要噪声模型

射频光纤传输链路有源器件的噪声主要包含热噪声、探测器散粒噪声、自发辐射拍噪声和激光器相对强度（RIN）噪声。

射频传输链路的热噪声包含输入端和输出端两部分的噪声，其噪声功率谱密度N_{th}可表示为：

$$N_{\mathrm{th}}=k_{\mathrm{B}}TB\left(g+1\right) \tag{1}$$

式中，k_{B}为玻尔兹曼常数，T为温度，B为频率带宽，g为链路增益，由于链路增益一般为−20 dB以下，可认为$g\ll 1$，计算可得热噪声功率谱密度为−174 dBm/Hz。

散粒噪声功率谱密度同热噪声一样，也是白噪声，其均方根电流谱密度为：

$$i_{\mathrm{sh}}{}^{2}=2eI_{\mathrm{dc}} \tag{2}$$

式中，e为基本电荷常数，I_{dc}为探测器回路直流电流。若探测器输出阻抗为50 Ω，则散粒噪声功率谱密度N_{shot}可表示为：

$$N_{\mathrm{shot}}=10\log(2eZI_{\mathrm{dc}})=-168+10\log(I_{\mathrm{dc}}) \tag{3}$$

激光器相对强度噪声是光功率波动ΔP的均方值与平均光功率P的比值，其影响通常表现为光电探测器输出的光电流噪声，表示为：

$$RIN_{\mathrm{laser}}=\left\langle(\Delta P)^{2}\right\rangle/\left\langle P\right\rangle^{2}=\left\langle(\Delta I)^{2}\right\rangle/\left\langle I\right\rangle^{2} \tag{4}$$

式中，ΔI和I分别为探测器输出光电流波动与平均光电流。对于输出阻抗为50 Ω的光电探测器，激光器RIN引入的噪声功率谱密度为：

$$\begin{aligned}N_{\mathrm{RIN}}&=10\lg\left[\left\langle 50(\Delta I)^{2}\right\rangle\right]-30=\\&-13+20\lg(I_{\mathrm{dc}})+RIN_{\mathrm{laser}}\end{aligned} \tag{5}$$

式中，RIN_{laser}为激光器的相对强度噪声。从上式可以看到，激光器RIN噪声越大，其产生的射频（RF）噪声功率谱密度越大。并且随着探测器输出直流电流值提高，激光器RIN噪声产生的RF噪声功率谱密度越大。

当传输链路中有光放大器时，光放大器内部的自发辐射拍噪声也是一个重要的有源噪声来源，光放大器引入的相对强度噪声可表示为[8]：

$$RIN_{\mathrm{EDFA}}=-155.9+NF_{\mathrm{EDFA}}-P_{\mathrm{in}} \tag{6}$$

式中，NF_{EDFA}为光放大器的噪声系数，P_{in}为进入光放大器的输入光功率。

1.2 光纤中光传输噪声模型

当光在光纤中传输时，光纤的多重瑞利散射、色散、受激布里渊等非线性散射等都会引入噪声，进而影响光纤中传输的射频信号的相噪。

多重瑞利散射噪声是当光载射频信号在光纤中传输时，瑞利散射信号在光纤中的损耗点之间的多次来回反射信号产生的多个瑞利散射信号之间的干涉引起的，该干涉信号的相对强度噪声模型可表示为[9]：

$$RIN_{\mathrm{DRS}}=2R_{\mathrm{bs}}^{2}(2\alpha L+e^{-2\alpha L}-1)\frac{\Delta\nu}{\pi[f^{2}+(\Delta\nu)^{2}]} \tag{7}$$

式中，R_{bs}是光纤后向瑞利散射的反射系数，α是损耗系数，L是光纤长度，$\Delta\nu$是洛伦兹谱线线宽，f是射频信号频率。

激光器的频率抖动，通过光纤的色散转化为强度噪声，进而影响射频信号的相噪。由激光器的频率抖动经过光纤色散实现的相位到强度噪声的转化关系可表示为[10]：

$$RIN(\tilde{\omega})=\frac{4\Delta\omega}{\Delta\omega^{2}+\tilde{\omega}}\times\{1-e^{-\Delta\omega|\beta_{2}L\tilde{\omega}|}\times[\cos(\beta_{2}L\tilde{\omega}^{2})+\frac{\Delta\omega}{\tilde{\omega}}\sin(\beta_{2}L\tilde{\omega}^{2})]\} \tag{8}$$

式中，$\Delta\omega$为激光器的线宽，$\tilde{\omega}$为激光器频率偏离中心频率的偏移量，β_2为光纤色散系数，L为光纤长度。光纤长度越长，激光器频率抖动转化为强度噪声的绝对值越大。

2　微波光纤传输相噪的优化分析

为了确保射频信号经过光纤传输后不出现明显恶化，采用外参考相位锁定的方法可有效抑制光纤传输链路引入的噪声，实现射频信号的高保真相噪指标。该方法将光纤传输链路输出的射频信号作为参考信号输入到 10 MHz 锁相晶振的参考端，调节锁相晶振的锁相带宽，进而优化输出射频信号一定带宽范围内的相噪指标，从而实现对光纤传输链路噪声的抑制。该方法原理图如图 1 所示。

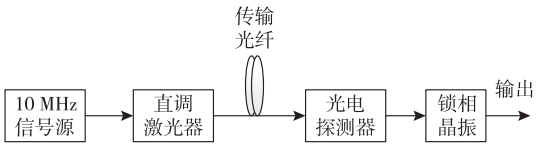


图 1　采用锁相晶振实现相噪优化原理图

上述原理的频域模型可用图 2 表示[11-12]。

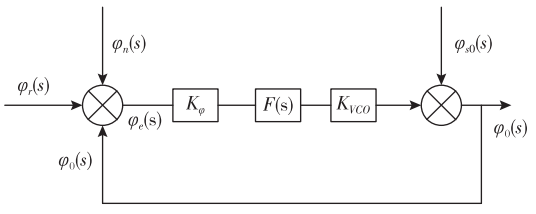


图 2　外参考锁定环路噪声模型

参考信号与晶振输出的反馈信号经过混频后的相位差$\varphi_e(s)$可表示为：

$$\varphi_e(s)=\varphi_r(s)-\varphi_0(s)+\varphi_n(s) \tag{9}$$

式中，$\varphi_r(s)$和$\varphi_0(s)$分别为参考信号和锁相晶振的瞬时相位，$\varphi_n(s)$为锁相环回路的噪声。经过锁相环锁定后，锁相晶振输出信号的相噪可表示为：

$$\varphi_0(s)=\varphi_{s0}(s)+G(s)\varphi_e(s) \tag{10}$$

式中，$\varphi_{s0}(s)$为锁相晶振在没有外参考输入信号时的噪声，$G(s)$为环路增益。

将公式(9)代入公式(10)，可得：

$$\varphi_0(s)=\frac{1}{1+G(s)}\varphi_{s0}(s)+\frac{G(s)}{1+G(s)}[\varphi_r(s)+\varphi_n(s)] \tag{11}$$

从上式可以看到，当存在外参考信号输入时，锁相晶振输出信号的相噪由两部分组成，一部分是锁相晶振没有外参考输入信号时的自身振荡固有噪声，另一部分是外参考输入信号的噪声。通过调整锁相晶振的锁相带宽f_B，可以使锁相晶振的输出信号相噪在低于锁相带宽时由参考信号相噪决定，在高于锁相带宽时由锁相晶振本身相噪决定。

3　实验结果、分析与讨论

为了验证射频信号经过光纤传输链路后相位噪声的变化情况，本实验利用 10 MHz 点频信号来进行测试。如图 3 为一个典型的 10 MHz 点频信号光纤传输链路原理图。

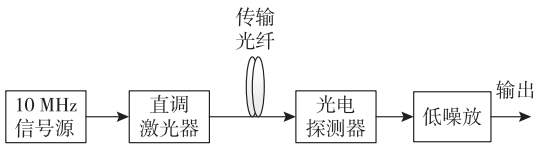


图 3　射频信号传输链路原理图

在实验中，10 MHz 点频信号通过直调激光器直接调制的方式被加载到光域上形成光载射频信号，该光载射频信号通过光纤传输至输出端，在输出端通过高速光电探测器将光信号恢复成射频信号并通过射频放大器放大后输出。

实验中使用两种 10 MHz 的信号源，分别是 Keysight 的 8267D 输出的 10 MHz 信号和上频科技的锁相晶振。测试时，两种信号源输出的信号功率均为 9 dBm，相噪测试仪器为 Agilent5052B。两种信号源的相噪测量结果如图 4 所示。从测试结果可以看到，锁相晶振输出信号的相噪在频偏大于 30 Hz 时要明显优于 8267D 输出信号，在 1 kHz 频偏处的相噪优于－165 dBc/Hz。

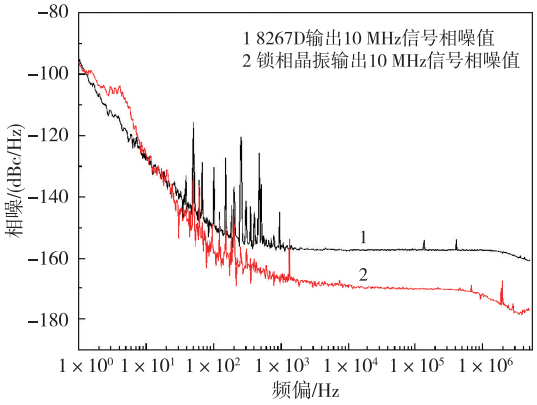


图4 两种10MHz信号源相噪测试结果图

为了测试射频信号经过光纤传输链路后相噪恶化的情况，采用中国电子科技集团公司第四十四研究所的带宽为3 GHz的直调激光器和带宽为18 GHz的光电探测器，以及1 km光缆组成的射频光纤传输链路进行测试。直调激光器输出光功率为9.6 dBm，光电探测器的饱和光功率为10 dBm。由于不同光传输链路光损耗不同会使得进入光电探测器的光功率不同，而光电探测器的散粒噪声和强度至相位噪声系数与入射进探测器的光强有关。因此，本实验使用可调光衰减器调节进入光电探测器的光功率，测试在不同光功率条件下，8267D输出的10 MHz信号经过1 km光纤传输后的相噪值。测试结果如图5所示。

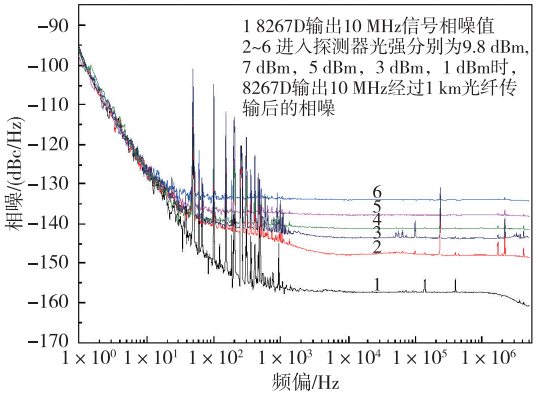


图5 8267D输出的10 MHz信号经过1 km光纤传输后，在不同光功率下的相噪测试结果

在图5中，曲线1为8267D输出的10 MHz信号的相噪值，曲线2至曲线6分别是当光功率为9.8 dBm，7 dBm，5 dBm，3 dBm和1 dBm时，8267D输出的10 MHz信号经过1 km光纤传输后的相噪值。可以看到，在射频信号经过射频光纤传输链路传输后，相噪有明显恶化，并且进入光电探测器的光功率越低，相噪恶化越明显。这是由于进入光电探测器的光功率越低，信号衰减相对于噪声衰减要大一倍，导致信号的信噪比降低，从而使得信号的相噪随传输链路插损的增大而恶化。

为验证本方案的可行性，实验中在光电探测器输出端加入锁相晶振来优化射频光传输链路的相噪，测试结果如图6所示。

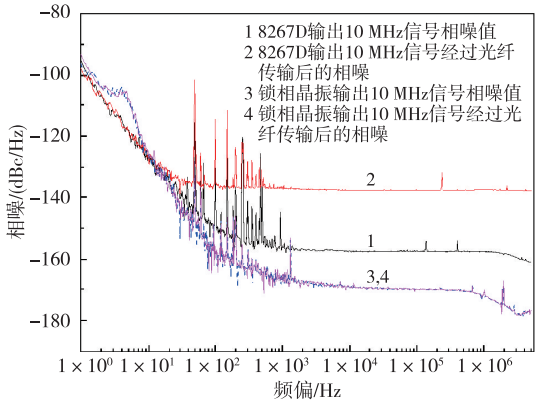


图6 采用锁相晶振进行链路相噪优化前后对比图

在图6中，曲线1为8267D输出的10 MHz信号的相噪值；曲线2为当光功率为9.8 dBm时，8267D输出的10 MHz信号经过1 km光纤传输后的相噪值；曲线3为锁相晶振的相噪；曲线4为基于曲线2测试结果，在探测器输出端加入锁相晶振的相噪优化结果。可以看出，在锁相晶振的锁相带宽10 Hz范围外，链路输出的10 MHz信号相噪完全由锁相晶振决定，输出信号的相噪指标在频偏大于20 Hz后有明显改善。当频偏大于1 kHz时，相噪优化效果超过30 dB。此外，曲线3和曲线4高度重合，说明通过锁相晶振可以完全消除光链路插损和噪声对传输的射频信号相噪的影响。

由于目前在时钟信号分发及其他点频信号的应用中，10 MHz和100 MHz频率的时钟较为常见，本文选择采用点频锁相晶振进行了相关实验。如果待传输信号为宽带射频信号，可采用宽带锁相环来实现对宽带信号光传输的相噪优化。

4 总结

本文提出一种射频光纤传输链路相噪优化方法。通过理论分析，建立了射频光纤传输链路中有源器件的热噪声、散粒噪声、激光器相对强度噪声和光放大器的理论模型，并进一步建立了光载射频信号在光纤中传输时的多重瑞利散射和色散致噪声两种占主导因素的噪声模型。此外，分析并提出

了外参考信号锁定光传输链路相位噪声的优化模型和方法。以1 km的射频光纤传输链路为例，采用带外参考锁定的锁相晶振进行了相噪优化实验研究。实验测试了在不同光损耗情况下射频光纤传输链路的相噪，结果表明通过在光电探测器输出端接一锁相晶振，使得锁相带宽外的射频光传输链路相噪指标提升了近30 dB。该方法不受光传输链路插损的影响，具有较强的鲁棒性和实用价值。

参考文献：

[1] Schioppo M, Brown R C, McGrew W F, et al. Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles [J]. Nature Photonics, 2017, 11(1): 48-52.

[2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

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

[4] Qiu Z, Zhou Z, Zhong H, et al. On-chip bidirectional optical frequency shifter for optical frequency transfer [J]. Optics Letters, 2025, 50(4): 1132-1135.

[5] Shen J, Qiu Z, Xue R, et al. Multiple-branch optical frequency transfer without the frequency allocation constraints [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(17): 5529-5537.

[6] Secondini M, Bogoni A, Forestieri E, et al. Phase noise mitigation in photonics-based radio frequency multiplication [J]. Optics Letters, 2023, 48(5): 1228-1231.

[7] 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.

[8] Urick V J, Bucholtz F, McKinney J D, et al. Long-haul analog photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(8): 1182-1205.

[9] Wan P, Conradi J. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 288-297.

[10] Marshall W K, Crosignani B, Yariv A. Laser phase noise to intensity noise conversion by lowest-order group-velocity dispersion in optical fiber: exact theory[J]. Optics Letters, 2000, 25(3): 165-167.

[11] Wang X, Yao X S. Phase-locked opto-electronic oscillator (OEO) of ultralow phase noise with record-low allan deviation of 3.4×10^{-14} at 1 s[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(12): 5381-5392.

[12] Zhang L, Poddar A K, Rohde U L, et al. Self-ILPLL using optical feedback for phase noise reduction in microwave oscillators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 624-627.

作者简介：

陈信伟(1982—)，男，江西省吉安市人，博士，高级工程师，主要研究方向为光纤传感和微波光子。