

文章编号: 1001-3806(2016)04-0582-04

## 可调 RF 信号光传输系统相位噪声优化设计

方水平

(北京工业职业技术学院 信息工程系, 北京 100042)

**摘要:** 为了优化宽泛可调的低频基准射频信号系统、降低射频生成系统的相位噪声, 采用减少部件的优化设计方法, 使用调幅器改善相位噪声, 实现了系统设计的简化。经过理论分析和实验验证, 取得了低频射频信号条件下的系统相位噪声与频率偏移数据。结果表明, 可以通过机械隔离来消除由于光纤振动产生的过量相位噪声。这在未来的光通信领域中具有一定的应用价值和实际意义。

**关键词:** 光通信; 相位噪声优化; 调幅器; 射频

中图分类号: TN929.18

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.026

## Optimization design of phase noise of adjustable RF signal of optical transmission systems

FANG Shuiping

(School of Information Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

**Abstract:** In order to improve configuration of a widely tunable low-frequency optical radio frequency (RF) generation system and reduce phase noise of the system, a simplified system design was demonstrated with fewer components and improved phase noise performance by using an amplitude modulator. After theoretical analysis and experimental verification, the data of system phase noise and frequency offset was obtained under low-frequency radio signal conditions. The results show that, excess phase noise due to acoustic vibrations of optical fibers can be successfully eliminated by mechanical isolation. The study has some value and practical significance in the field of optical communication in the future.

**Key words:** optical communication; phase noise optimization; modulator; radio frequency

### 引言

高光谱纯度射频 (radio frequency, RF) 信号以及超宽调谐范围的合成对光纤载射频系统和仪表的实现具重大意义<sup>[1]</sup>。光学射频生成本身能提供大量的带宽, 因为波长中小量的转移对应频率间大的变化<sup>[2]</sup>。例如, 当在 1550nm 附近操作时, 仅 1.6nm 的波长变化可覆盖射频带宽 200GHz。光学射频通常通过光电二极管的外差作用产生, 并以多种方式实现<sup>[3]</sup>。系统已根据多种技术进行演示, 如直接混合、调制边带的直接混合、多波长激光、光学锁相环 (optical phase locked loop, OPLL), 以及注入锁定方案的多种类型<sup>[4]</sup>。可调及纯光谱光学射频生成系统, 尤其是低于 32GHz 射频

频率的产生, 以及该系统中相位噪声的降低受到了极大的关注<sup>[5]</sup>。该光学射频生成系统基于调制边带注入锁定方案<sup>[6]</sup>。调制边带注入锁定极具优越性, 因为当规避反馈机制和超窄带宽滤波器需求时, 其在未消耗功率的情况下, 提供了连续的可调谐性以及谐波抑制<sup>[7]</sup>。

### 1 调幅器系统设计

相位噪声在光学射频生成系统中有多种电位源<sup>[8]</sup>, 除了按比例划分的局部射频振荡器的最小相位噪声, 相位噪声还包括激光的自发发射、光纤热量及振动效应、路径长度失配、因注入功率不足产生的不相关残余光学噪声、激光驱动电流波动以及光电二极管中的散粒噪声<sup>[9]</sup>。两种占主导优势的噪声源的产生原因, 通过试验方法及理论方法确定是因光纤中不足注入功率和振动效应引起不相关的残余光学噪声产生<sup>[10]</sup>。在早前的系统中, 一个相位调制器和两个串联密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 滤波器用于生成注入锁定的边带, 减轻载波承重; 根据调制深度, 噪音通常比第 1 阶边带强 10dB

基金项目: 北京市教委科学研究-科研计划资助项目 (KM201410853006); 北京工业职业技术学院校内科研课题资助项目 (bgzykyz201503)

作者简介: 方水平 (1971-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光通信技术、通信传输技术教学及研究工作。

E-mail: fshpbpc@sina.com

收稿日期: 2015-04-23; 收到修改稿日期: 2015-05-27

或更多<sup>[11]</sup>。滤波器的总滚降量约为 1.35dB/GHz, 插入损耗约为 3.9dB。这些损耗是频率低于 32GHz 时造成注入功率不足的原因<sup>[12]</sup>。作者发现, 在偏移频率低于 20kHz 时, 即使注入光功率足够大, 因振动耦合到光纤的大量过剩的相位噪声, 将会超过系统所分配的参考比例值<sup>[13]</sup>。本文中设计的调幅器系统如图 1 所示。

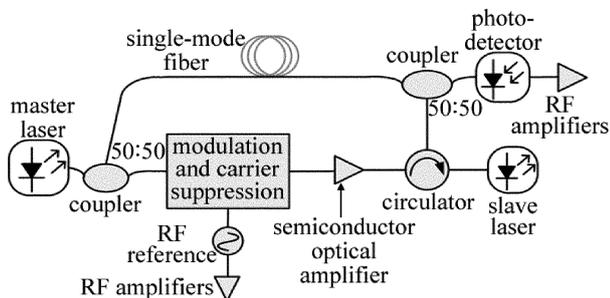


Fig. 1 Layout of radio frequency signal generation system based on injection-locked lasers

作者用单个调幅器更换相位调制器和滤波器, 调幅器可偏向零点, 抑制载波, 解除对滤光器的需求。该功能使得调幅器配置在多个方面显示出优势。首先, 通过充分操作主激光器降低滤波器边缘, 以提供充分的抑制, 恢复滤波器中损失的所有低阶谐波边带功率。其次, 通过使用滤波器消除了相关插入损耗, 提供了最大可注入光学功率。这两种优点尤为重要, 因为噪声抑制取决于注入功率。这种配置的另一优点是在调制器的功能域范围内抑制任何光学频率中的载波, 消除在滤波器抑制带边缘工作的限制, 这种方法改善了系统适应性。最后, 这个配置减少了部件数量, 穿过机械振动的光纤数量可耦合。

使用调幅器可能存在的一个弊端, 即偏压的需求可能会潜在地引起长期稳定性问题<sup>[14]</sup>。幸好, 调幅器广泛应用于通讯行业, 偏压控制反馈电路很容易克服这个问题。在该实验中, 作者使用了单臂驱动 z 切向铌酸锂调制器, 如图 2a 所示。图 2 中, 输入信号为  $E_{in}(t)$ ,

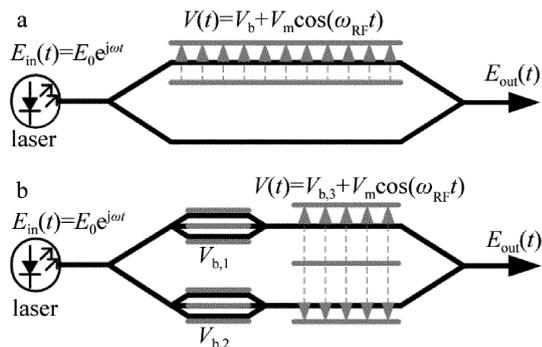


Fig. 2 a—single-arm drive z-cut lithium niobate Mach-Zehnder modulator  
b—dual-parallel balanced-drive x-cut lithium niobate Mach-Zehnder modulator

$E_{in}(t) = \text{Re}\{E_0 e^{j\omega t}\}$ , 其中  $t$  为时间,  $E_0$  为输入光场的振幅,  $\omega$  为光的频率, 相位调制器的驱动电压为  $V(t)$ , 且满足条件  $V(t) = V_b + V_m \cos(\omega_{RF} t)$ ,  $\omega_{RF}$  为驱动电压频率,  $V_b$  为偏置电压,  $V_{b,1}, V_{b,2}$  分别为双臂上直流偏压引入的直流偏置相位,  $V_m$  为调制电压幅值, 则经相位调制器的输出光场为  $E_{out}(t)$ 。

该调制器为载波提供了大于 20dB 的消光比, 足以将载波减少至低于第 1 阶边带的功率。如图 2b 所示, 通过使用平衡驱动 x 切向铌酸锂调制器以及双平行 Mach-Zehnder 配置, 调零能力可得到改善。这样可在各力臂中实现独立振幅控制, 以便在任一工作频率获得最佳载波消光比。此外, 平衡驱动可以使其它偶数阶边带趋于零, 载波除外。

## 2 调幅器系统仿真实验分析

在图 1 所示的调幅器系统中, 可调微波信号发生器以及饱和宽频射频放大器起到了失真元素的作用, 驱动仅受电压供应偏压的调幅器。由饱和放大器产生并通过调制器的谐波电场量级由  $J_1\left(\frac{x}{n}\right)$  确定, 滚降量为  $\frac{1}{n} \frac{x}{2}$ , 而由调制器非线性产生的谐波, 由  $J_n(x)$  确定, 滚降量为  $\left(\frac{1}{n!}\right)\left(\frac{x}{2}\right)^n$ , 其中  $x = \pi\left(\frac{V}{V_\pi}\right)$ ,  $V$  为驱动电压,  $V_\pi$  为偏置电压。对于实施系统,  $V \leq 2.5V$ ,  $V_\pi \approx 5V$ , 因此  $x \leq (\pi/2)$ 。这意味着通过第 3 次谐波, 调制器非线性起到的作用小于等于功率的 1/16, 可以忽略不计。因此, 饱和放大器是系统中谐波功率的主要来源。然后, 谐波边带通过半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 进行放大, 从而注入到从动激光器。

用 SOA 替代掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber application amplifier, EDFA) 是因为 EDFA 对输入功率要求最低<sup>[15]</sup>, 通常为 -3dBm, 而系统中所产生的边带不满足此要求。然后, 主激光器和从动激光器在光电二极管上混合在一起, 产生射频信号, 该信号通过宽频射频放大器放大, 以防止相位噪声测定受限于频谱分析仪本底噪声。在诸如此类的倍频系统中, 相位噪声与  $N$  倍倍频器一起缩放为  $20(\lg N)$ 。值得注意的是, 由于本系统中的激光器不是最佳滤波器, 在另一个注入谐波中仍有一些残余部分。这些残余部分通常比取决于注入功率的期望射频信号弱 24dB ~ 39dB。这种谐波抑制可与典型商用射频信号发生器所限定的内容相提并论。

通过系统机械隔离, 将其安装在硬板上, 适当将所

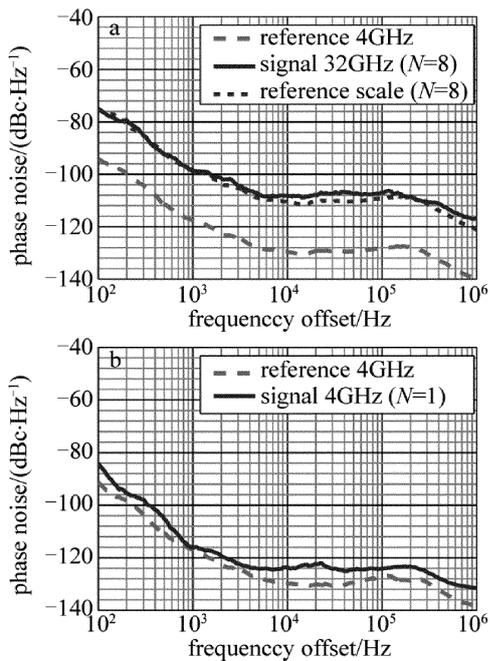


Fig. 3 a—relationship between phase noise and frequency offset of signal at 32GHz b—relationship of phase noise and frequency offset of signal at 4GHz

有光纤用胶带固定在板上,并将该板放置在泡沫上,可以消除光纤振动噪声,图3a所示为在所有偏移频率条件下,高度匹配比例参考值结果。使用下式来描述<sup>[16]</sup>:

$$N_e = N_s - N_r \quad (1)$$

式中,  $N_e$  为剩余相位噪声,  $N_s$  为信号的相位噪声,  $N_r$  为参考信号相位噪声。

图3b中比较了本次实验和参考实验中的光学射频及参考比例值,显示了在低偏移频率条件下高达29dB的巨大改进情况,超过之前报告的结果。

如上所述,最小相位噪声的实现受限于比例射频参考值的相位噪声。为了明确如何较好地抑制噪声,作者检查了4GHz第1阶谐波的光学射频生成,因为其含有一个低于32GHz信号的可能性本底噪声。

图4所示为迄今为止系统最佳相位噪声的性能,通过该系统可消除由DWDM滤波器滚降和插入损耗

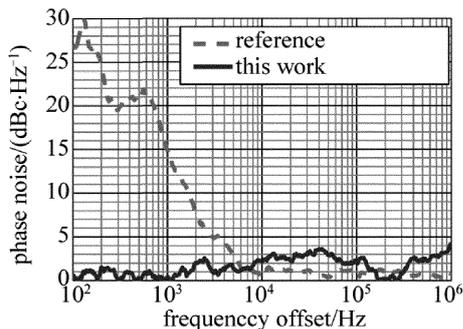


Fig. 4 Relationship between phase noise and frequency offset of experiment and reference

而引起的损耗,实验结果显示,该相位调制器系统共消除了约29dB的损耗。由此可见,当噪声级为-123dBc/Hz,频率低于4kHz时适配。鉴于曲线形状,参考信号和光学产生信号间的差异很可能是由于不充分的注入功率充分关联主激光器和从动激光器所致。值得注意的是,这个最小相位噪声结果在4GHz ( $N=1$ )时并非刚好适用;但是当给定更好的基准振荡器和充足的注入功率时,在任何频率/乘数条件下都可适用,因为最小噪声的实现取决于比例基准振荡器,而光学产生信号符合比例基准振荡器的能力又主要取决于注入光功率。

### 3 结论

使用调幅器证明了一个系统设计,该系统设计提供了改良的系统适应性、可用更少部件进行操作、无边带功率损耗,最终在射频频率低于32GHz时实现改良相位噪声性能。通过机械隔离系统,同样成功消除了系统中因光纤振动而产生的过量相位噪声。最终,在10kHz向4GHz偏移时,证明了新的最小相位噪声-123dBc/Hz。未来,系统可通过双向平行Mach-Zehnder调制器的使用以及通过完整系统整合的光纤消除得以改进。

### 参考文献

- [1] LI D L, LU L, ZHANG B F, *et al.* New microwave frequency dissemination method over optical fiber based on the phase fluctuation compensated at remote sites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 36-40(in Chinese).
- [2] LI D L, CHENG Q M, ZHANG B F, *et al.* Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010602(in Chinese).
- [3] CHEN R H, WU G L, ZOU W W, *et al.* Optical phase compensation system design for frequency transferover optical fiber [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(4): 1-4(in Chinese).
- [4] ZHANG A, DAI Y, YIN F, *et al.* Stable radio-frequency delivery by  $\lambda$  dispersion-induced optical tunable delay [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2419-2421.
- [5] HE Y, ORR B, BALDWIN K, *et al.* Super continuum generation in quasi-phase matched waveguides [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18754-18764.
- [6] ZHU M, ZHANG L, FAN S, *et al.* Efficient delivery of integrated wired and wireless services in UDWDM-RoF-PON coherent access network [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1127-1129.
- [7] SHIH P T, LIN C T, JIANG W J, *et al.* Full duplex 60GHz RoF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19501-19508.
- [8] SUN D, DONG Y, YI L, *et al.* Photonic generation of millimeter and terahertz waves with high phase stability [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1493-1496.

- [9] KUMAGAI M, FUJIEDA M, NAGANO S, *et al.* Coherent microwave transfer over a 204km telecom fiber link by a cascaded system [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(1):168-174.
- [10] WANG S, SUN D, DONG Y, *et al.* Distribution of high-stability 10GHz local oscillator over 100km optical fiber with accurate phase-correction system [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 888-891.
- [11] MARRA G, SLAVIK R, MARGOLIS H S, *et al.* High-resolution microwave frequency transfer over an 86km-long optical fiber network using a mode-locked laser [J]. Optics Letters, 2011, 36(4):511-513.
- [12] KIUCHI H. Highly stable millimeter-wave signal distribution with an optical round-trip phase stabilizer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(6):1493-1500.
- [13] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, LOURS M, *et al.* High-resolution microwave frequency dissemination on an 86km urban optical link [J]. Applied Physics, 2010, 98(4):723-727.
- [14] KUMAGAI M, FUJIEDA M, NAGANO S, *et al.* Stable radio frequency transfer in 114km urban optical fiber link [J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2949-2951.
- [15] FUJIEDA M, KUMAGAI M, GOTOH T, *et al.* Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1223-1128.
- [16] NING B, HOU D, ZHENG T, *et al.* Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(16): 1551-1554.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©