

# 多级复合环路光学锁相环技术研究

赵馨<sup>1</sup>, 董岩<sup>1\*</sup>, 刘洋<sup>2</sup>, 宋延嵩<sup>2</sup>, 常帅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 星间相干通信系统其多普勒频移达到了吉赫兹量级,同时受到调谐激光器线宽、相位噪声的影响,对光学锁相环路系统提出了高要求。依据科斯塔斯锁相环技术原理,将温度调谐、压电陶瓷(PZT)调谐、声光移频器(AOFS)调谐复合到一起,通过内环与外环方式对本振激光器进行调控,实现光学锁相功能。搭建实验测试系统对环路性能进行测试,结果表明:此系统可达到锁相范围为 4 GHz,锁相带宽为 1.7 MHz,实现了信号光与本振光之间的多普勒频移跟踪、激光器线宽补偿及相位快速锁定,最终相位残余误差 5.1°。

**关键词** 光通信;多普勒频移;光学锁相环;调谐激光器;复合环路

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0506002

## Optical Phase Locked Loop Technology Based on Multistage Compound Loops

Zhao Xin<sup>1</sup>, Dong Yan<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>2</sup>, Song Yansong<sup>2</sup>, Chang Shuai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The Doppler frequency shift of the inter-satellite coherent communication system reaches the order of Gigahertz. At the same time, it is affected by the line width and phase noise of the tuning laser, which imposes high requirements on the optical phase-locked loop system. Based on Costas loop technology, an optical locked loop is achieved through inner and outer loops, and the local laser is tuned when the tuning of temperature, piezoelectric ceramics(PZT), and acousto-optic modulation device(AOFS) are compounded together. An experimental test system is set up to test the performance of the loops. It turns out that this system is capable of a phase locked range of 4 GHz and a phase locked bandwidth of 1.7 MHz. Doppler frequency shift between the signal light and the local laser can be tracked, line width of the laser is compensated and the phase is locked quickly with a final residual phase error of 5.1°.

**Key words** optical communications; Doppler shift; optical phase locked loop; tuning lasers; compound loop

**OCIS codes** 060.4510; 060.4256

## 1 引 言

由于速率高、体积小、功耗低、安全性能好、通信频带宽等优点,空间激光通信系统具有广阔的发展前景。从体制上激光通信可以分为强度调制/直接探测(IM/DD)、相位调制/相干探测两种方式,而相干探测具有灵敏度高、信息容量大、调制方式多样、

抗背景干扰强等特点,使其成为近年的研究热点<sup>[1]</sup>。光学锁相环(OPLL)是相干通信的重要组成部分,通常由光混频器、光压控振荡器(OVCO)、环路滤波器 3 个部分构成<sup>[2]</sup>。对于零差相干系统,锁相环需要实现信号光与本振光之间频差为零、相差最小,才能完成基带信号提取<sup>[3]</sup>。早期由于受到激光器调谐范围、相位噪声大的影响,光学锁相环路无法及时响

收稿日期: 2017-10-23; 收到修改稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91438204)、吉林省重点科技研发项目(20180201002SF)

作者简介: 赵馨(1977—),男,博士,副教授,主要从事空间光通信等方面的研究。E-mail: gps.ins@163.com

\* 通信联系人。E-mail: dongyan-personal@163.com

应主从激光器间的快速相位误差变化,从而造成失锁<sup>[4-5]</sup>。复合环路技术可以提高锁相环系统性能,Satyan等<sup>[6]</sup>对比研究了外差锁相环、双环路、复合环路光学锁相的性能,结果表明复合环路可以明显降低锁相后的相位噪声。由于技术的不断发展,最新的光电集成技术已经能够将一套完成的OPLL系统集成在10 cm×10 cm的芯片上,实现1.1 GHz的锁相带宽,对10 MHz线宽的分布反馈式(DBR)激光器进行锁相,有效地解决环路带宽与环路延迟之间的相互限制<sup>[7]</sup>。在系统实验方面,2008年2月德国航天中心(DLR)资助的TeSAT公司成功进行星间双向相干通信演示实验,通信速率为5.625 Gb·s<sup>-1</sup><sup>[1]</sup>。2011年,美国NFIRE卫星与地面间开展了星地激光通信实验研究,进一步验证了星地相干激光通信的可行性<sup>[8]</sup>。

对于星间相干通信系统,其多普勒频移达到吉赫兹量级,同时受到激光器线宽、相位噪声的影响,对光学锁环路系统提出高要求。本文以科斯塔斯环原理为依据,设计多级环路光锁相系统,将温度调谐、压电陶瓷(PZT)调谐、声光移频器(AOFS)调谐复合到一起,通过内环与外环方式对本振激光器进行调控,完成光学锁相功能。多级环路方法可有效解决锁相范围宽与环路带宽窄之间的矛盾,在实现宽范围多普勒频移补偿的同时,通过优化环路带宽可有效抑制激光器线宽、相位噪声对锁相环系统的影响,保证光学锁相环正常工作。

## 2 链路特性分析

星间激光通信时,由于卫星相对位置的变化,光载波的频率会产生多普勒频移。设光源在 $v$ 方向上以速率 $v$ 运动,光波的传播方向与 $v$ 夹角为 $\theta$ 。对观察者而言,光载波的多普勒频移量为

$$\Delta f = \left( \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} - 1 \right) f, \quad (1)$$

式中: $\beta=v/c$ ;  $c$ 为光速; $f$ 为光载波频率。以导航卫星系统为例,图1、图2分别给出中轨道(MEO)卫星间、中轨道-高轨道(MEO-GEO)卫星间的多普勒频移变化仿真结果,图中S21-S22表示中轨道卫星编号,G1-G3表示高轨道卫星编号。

由图1可知,MEO星间链路的多普勒频移最大可达到4 GHz<sup>[9]</sup>,如果是LEO-GEO,链路其多普勒频移最大将达到10 GHz<sup>[10]</sup>。光锁相环不但要完成大范围的频率捕获,还要在小范围内实现相位锁定。另外,受到激光器线宽、相位噪声、环路带宽、环

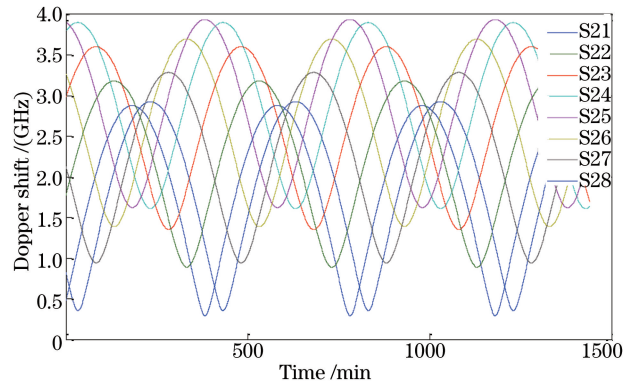


图1 MEO卫星间多普勒变化

Fig. 1 Doppler frequency shift between different MEO satellites

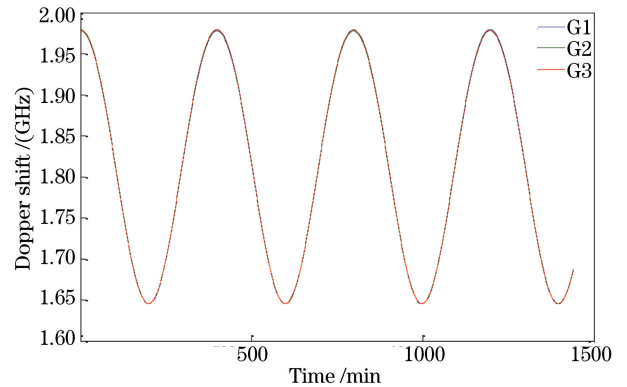


图2 MEO-GEO卫星间多普勒变化

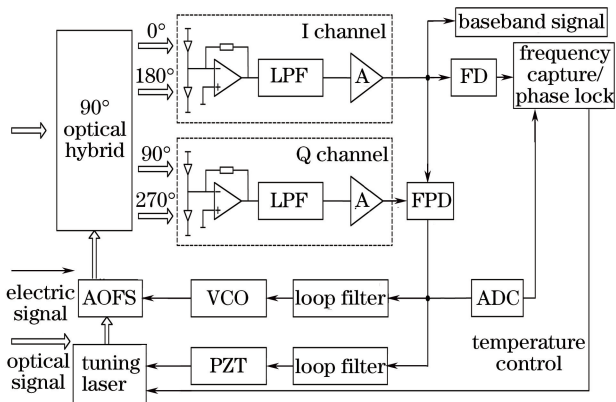
Fig. 2 Doppler frequency shift between GEO satellite and MEO satellite

路延迟等的限制,单级环路很难实现宽范围、高精度光锁相。采用多级复合环路实现光锁相技术,可有效提高锁相范围并有利于实现光相位快速锁定及相位误差抑制。

## 3 多级环路光学锁相原理

零差相干接收可实现最高灵敏度,但要求本振载波相位严格同步于信号载波,相位同步的误差将直接影响相干解调系统的误码率。为克服卫星运动引起的多普勒频移,并保证锁定时相位误差达到最小,系统采用粗/精频率跟踪环+相位跟踪环的三级锁相环路策略,进行频率捕获与相位锁定,整体环路原理如图3所示。

由图3可以看出多级环路光锁相环从本质上属于零差光学科斯塔斯环。可调谐激光器作为OVCO,其输出的本振光频率与相位受到3个方面的调控:1)通过温度控制输出光信号的频率;2)通过PZT控制激光器谐振腔长改变输出光信号的频率;3)在本振光输出回路中加入AOFS改变输出光信号的相位。理论上温度控制激光器输出频率,其调



• LPF: low-pass filter; A: amplifier; FD: frequency detector; FPD: phase/frequency detector; ADC: analog-digital controller; AOFS: acoustooptic frequency shifter; PZT: piezoelectric ceramics; VCO: voltage-controlled oscillator

图 3 多级环路光锁相原理

Fig. 3 Optical phase locked loop principle based on multi-stage compound loops

谐速度缓慢(赫兹量级),但是调谐范围较宽(可达到几十吉赫兹范围);改变激光器腔长调谐速度较快(千赫兹量级),调谐范围较窄(几吉赫兹范围);AOFS 则具有最快的调谐速度(20 MHz)与最窄的调谐范围(50 MHz)<sup>[11]</sup>。可以看出如果设计合理,3 个环路将协调、复合工作,可使光锁相环系统性能达到最优从而实现光锁相功能。

锁相环路相位噪声和白噪声是系统主要噪声源,选择合适的环路带宽可以抑制这两种噪声。相位噪声是本振激光器与信号激光器拍频噪声的主要来源,激光器的相位噪声功率谱密度为  $S_{pn}(f) = 2\Delta\nu/\pi f^2$ ,  $\Delta\nu$  为信号光激光器和本振光激光器的激光线宽。环路中散弹噪声也会引起额外相位误差  $S_{sn}(f) = 2qRP_{LO}kr^2$ ,  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C 为电荷量,  $R$  为响应率,  $k$  为混频器输出的分光比,  $P_{LO}$  为本振激光功率,  $r$  为放大率。根据上述传递函数可以得到相位噪声方差和散弹噪声方差分别为

$$\sigma_{pn}^2 = \frac{2.36\Delta\nu}{B_n}, \sigma_{sn}^2 = \frac{qB_n}{2RkP_s} \quad (2)$$

式中:  $P_s$  为信号光功率,  $B_n$  为环路带宽。可以看出相位噪声与线宽成正比,与环路带宽成反比;散弹噪声与环路带宽相关,为减小散弹噪声,需尽量减小环路带宽。系统总的相位噪声可以表示为  $\sigma_E^2 = \sigma_{sn}^2 + \sigma_{pn}^2$ , 对  $\sigma_E^2$  进行求导可以得到总体误差极值及最佳环路带宽。采用归一化环路带宽时,系统总的相位噪声方差可表示为<sup>[3]</sup>

$$\sigma_E^2 = 2.36 \frac{\Delta\nu}{B_n} + \frac{q}{2R} \frac{1}{R_{PLR}} \frac{B_n}{\Delta\nu} \quad (3)$$

式中:  $R_{PLR} = kP_s/\Delta\nu$  为功率线宽比;  $B_n/\Delta\nu$  为归一化环路带宽。对(3)式进行仿真结果如图 4 所示。

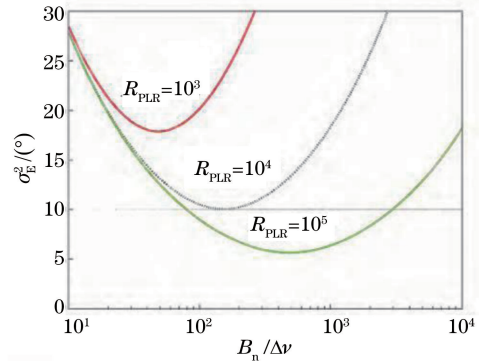


图 4 相位噪声方差与归一化带宽关系

Fig. 4 Relationship between phase noise variance and normalized loop bandwidth

由于系统设计时选用的信号光激光器与本振光激光器的线宽均为千赫兹量级,由图 4 可知,为达到较小的相位噪声,在优化信号光功率的同时,环路带宽同样需要优化选取,对于线宽为千赫兹量级的激光器,系统环路带宽应在兆赫兹量级。

## 4 多级环路光学锁相环路设计

### 4.1 粗频环路

粗频捕获环为外环,主要完成多普勒频移的补偿,由光混频器、平衡探测器、频率鉴别模块(FD)、环路滤波(LPF)、温度控制调谐激光器等部分构成。将 Costas 环的 I 支路输出送入 FD 中完成频率鉴别,通过控制激光器温度完成频率调谐。温度调谐平均速率为  $50 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可调节的最大范围 30 GHz,满足补偿星间多普勒频移的要求,外环路通过数字方式实现,环路带宽设计为 0.1 Hz,补偿后的残差为百兆赫兹量级。基本环路组成及原理如图 5 所示。

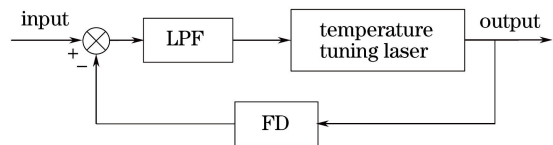


图 5 温度调谐原理

Fig. 5 Principle of temperature tuning laser

### 4.2 精频/相位环路

精频/相位环路为内环,完成频差为零、相差最小,锁相环性能主要由此环路决定。将多普勒频移补偿后信号的 I 支路与 Q 支路信号送入鉴频/鉴相器(FPD)实现混频信号下变频<sup>[12-13]</sup>, FPD 输出的差频信号控制 PZT 回路实现零差锁定, FPD 输出的

相差信号控制 AOFS 回路实现相差最小,完成锁相功能。内环可以用一个复合环路来分析<sup>[14-15]</sup>,其结构如图 6 所示,图 6 中  $\theta_i$  代表输入角度值, $\theta_o$  代表输出角度值, $s$  为拉普拉斯变量, $G_c$  与  $G_f$  分别为 PZT 回路 与 AOFS 回路, $A_c$ 、 $A_f$  分别为 PZT 回路 与 AOFS 回路的增益, $D_2$  为解耦回路, $D_1$  为探测器特性。令  $G_c = C_c \times A_c$ ,  $G_f = C_f \times A_f \times D_1$ , 则系 统的闭环传递函数为

$$H_{\text{closed}}(s) = \frac{G_c + C_f D_2 G_c + G_f}{(1 + G_c)(1 + C_f) + (D_2 - 1)C_f G_c}, \quad (4)$$

误差传递函数为

$$E(s) = \frac{1}{(1 + G_c)(1 + C_f) + (D_2 - 1)C_f G_c}. \quad (5)$$

当  $D_2 = 1$  时,复合系统的特征方程变为  $(1 + G_c)(1 + C_f)$ , 此时系统的耦合项被消除,系统为静态自主系 统,其误差传递函数为

$$E_c(s) = \frac{1}{(1 + G_c)(1 + G_f)}. \quad (6)$$

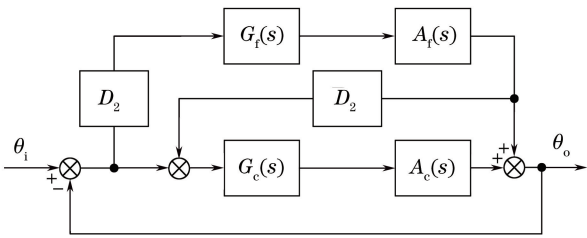


图 6 内环复合回路结构

Fig. 6 Compound structure of internal loop

### 1) PZT 控制回路 $G_c$ 设计

PZT 调谐回路通过不断减小信号光与本振光 之间频差的方式工作,差频信号主要包括多普勒残 余频差、两个激光器频差(由激光器线宽引起)。回 路中的平衡探测器实现位相差为  $180^\circ$  的两路信号 和差运算与低通滤波处理,在模型上可等效为惯性 环节: $G_a(s) = K_a / (T_a s + 1)$ ,其中  $K_a = 1$  为探测器 响应度增益, $T_a = 1.6 \times 10^{-10} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  为平横探测 器响应时间。FPD 鉴频等效为比例环节,其传递函 数为  $K_d = 1.53 \times 10^{-7}$ 。PZT 调谐激光器可等效为 一个惯性环节  $G_{\text{VPZT}}(s) = K_v / (T_v s + 1)$ ,其中  $K_v = 2.7 \times 10^8 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1}$  为控制增益, $T_v = 5.3 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  为 PZT 响应时间。则未加校正 的 PZT 调谐回路的开环补偿控制函数为

$$C_{\text{P0}}(s) = K_d G_a(s) G_{\text{VPZT}}(s) = 41.3 / [(5.3 \times 10^{-5} s + 1)(1.6 \times 10^{-10} s + 1)]. \quad (7)$$

PZT 调谐回路为典型 I 型系统,为使系统稳定 需要在回路中加入积分和超前滞后环节,校正后的 系统开环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{31426(3.9 \times 10^{-4} s + 1)}{s(1.6 \times 10^{-3} s + 1)(5.3 \times 10^{-5} s + 1)}. \quad (8)$$

根据(8)式绘制出开环对数幅频和相频特性曲线如 图 7 所示,幅度裕度为无穷大,即  $G_m = \text{Inf dB}$  (at  $\text{Inf kHz}$ ) (表明幅频曲线与  $-180^\circ$  轴没有交点),相 位裕度  $P_m = 55.4^\circ$  (at  $1.01 \text{ kHz}$ ),表明此系统稳定。 绘制出闭环特性曲线如图 8 所示。

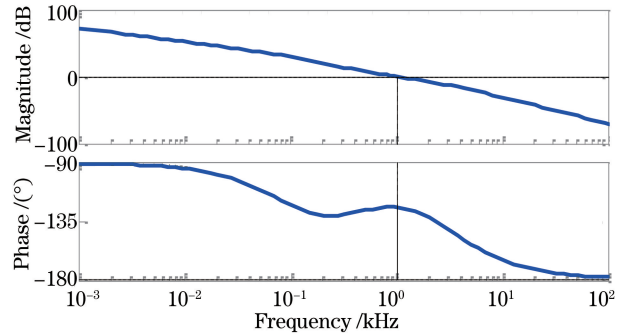


图 7 PZT 回路开环幅频特性曲线图

Fig. 7 Amplitude-frequency characteristic curve of PZT's open loop

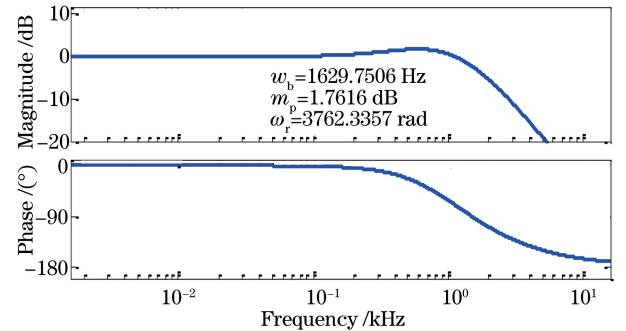


图 8 PZT 回路闭环幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curve of PZT's closed loop

可以看出,回路的相位裕度为  $75^\circ$  保证了系统的 稳定性,闭环回路带宽  $\omega_b = 1629.7506 \text{ Hz}$ ,谐振峰 频率  $\omega_r = 3762.3357 \text{ rad}$ ,谐振峰值  $m_p = 1.7616 \text{ dB}$ , 可满足 PZT 环路带宽要求。

### 2) AOFS 控制回路 $G_f$ 设计

AOFS 回路属于相位控制回路,环路带宽为兆 赫兹量级。FPD 的鉴相功能也属于比例环节, $K_d = 0.8 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1}$  为其传递函数。平衡探测器为共用单 元,其传递函数与 PZT 回路一样。AOFS 调制器等 效为惯性环节,传递函数为  $G_{\text{VAOFS}} = K_f / s(T_{\text{AO}} s + 1)$ , 其中  $K_f = 6.28 \times 10^7 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1}$ ,  $T_{\text{AO}}$  根据声光调制器



响应时间可确定为  $8 \times 10^{-9} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。则未加校正的回路开环传递函数为

$$G_{A0}(s) = K_d G_a(s) G_{VAOFS}(s) = 5 \times 10^7 / [s(1.6 \times 10^{-10}s + 1)(8 \times 10^{-9}s + 1)] \quad (9)$$

AOFS 回路为 II 型回路系统, 根据 II 型系统设计准则得到校正后的开环传递函数为

$$G_f(s) = 1.2 \times 10^{13} (5.57 \times 10^{-7}s + 1) / [s^2 (5.3 \times 10^{-5}s + 1)(8.1 \times 10^{-6}s + 1)(8 \times 10^{-9}s + 1)] \quad (10)$$

根据(10)式绘制出开环对数幅频和相频特性曲线如图 9 所示, 幅度裕度  $G_m = 24.1 \text{ dB}$  (at 5.27 MHz), 相位裕度  $P_m = 40.9^\circ$  (at 989 kHz), 表明 AOFS 回路系统稳定。绘制出闭环特性曲线如图 10 所示。

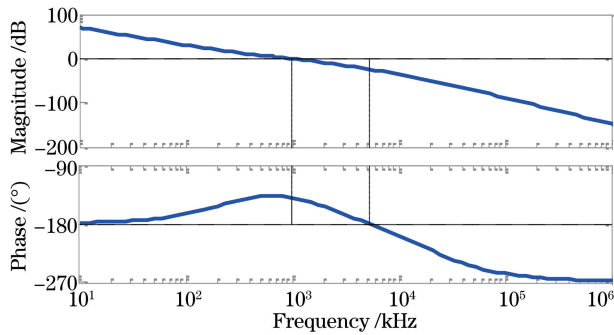


图 9 AOFS 回路开环幅频特性曲线图

Fig. 9 Amplitude-frequency characteristic curve of AOFS's open loop

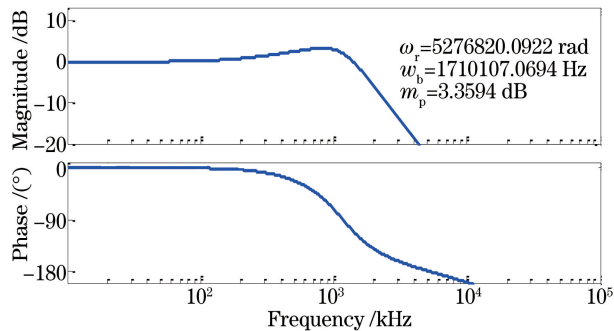


图 10 AOFS 回路闭环幅频特性曲线

Fig. 10 Amplitude-frequency characteristic curve of AOFS's closed loop

可以看出, 回路的相位裕度为  $40.9^\circ$  保证了系统的稳定性, 闭环回路带宽  $\omega_b = 1.7101 \text{ MHz}$ , 谐振峰频率  $\omega_r = 5.2768 \text{ Mrad}$ , 谐振峰值  $m_p = 3.3594 \text{ dB}$ , 可满足 AOFS 环路带宽要求。

## 5 实验测试

搭建桌面实验系统完成光锁相环性能测试, 整体组成原理如图 11 所示。在参考光源中通过控制器改变调谐激光器输出光信号频率模拟星间多普勒

频移, 信号调制格式为二进制相移键控 (BPSK), 调制速率为  $5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 由光纤混频器、平衡探测器模块、频率/相位鉴别模块、复合环路滤波模块、可调谐激光器模块等组成光锁相环系统。设置模拟多普勒频移的参考激光器调谐范围为  $0 \sim 4 \text{ GHz}$ , 本振调谐激光的温度调谐范围为  $30 \text{ GHz}$ , PZT 调谐范围为  $2.5 \text{ GHz}$ , AOFS 调节范围为  $50 \text{ MHz}$ , 本振激光器平均线宽为  $1 \text{ kHz}$ , 信号光激光器平均线宽为  $3 \text{ kHz}$ 。

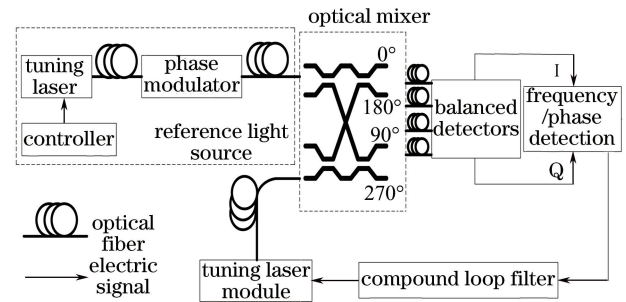


图 11 实验系统组成原理

Fig. 11 Principal of experiment system

在实验的过程中, 在 I 支路中加入示波器对整个锁相过程进行观测与记录, 显示的结果如图 12 和图 13 所示。

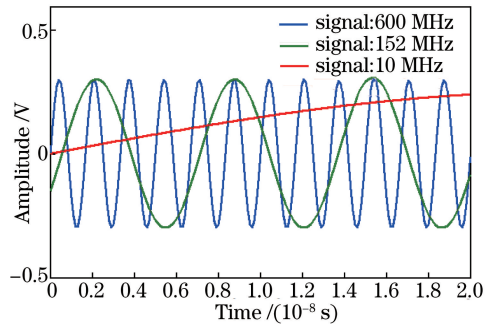


图 12 频率捕获过程

Fig. 12 Process of frequency acquisition

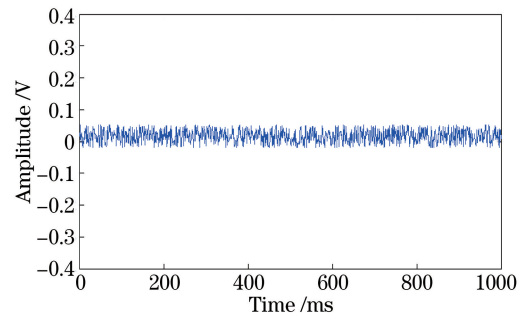


图 13 环路锁定后相位残差

Fig. 13 Phase residuals after loop locked

图 12 为频率捕获过程结果。此过程中首先激光器温度调谐, 将下变频信号从  $4 \text{ GHz}$  调整到  $600 \text{ MHz}$  左右 (图中蓝线所示), 然后, PZT 调谐, 将

下变频信号从 600 MHz 一直可调整到 10 MHz 左右(图中绿线为调整到 152 MHz 的中间结果),一旦下变频信号为 10 MHz 时(图中红线所示),即进入 AOFS 调谐环,环路可瞬时将频差调整为零,此时锁相环系统只剩下相位噪声信号(如图 13 所示),从而实现锁相功能。对图 13 中相位残差信号进行分析,信号峰-峰值为 0.071 V,结合系统设计时的指标平衡探测器响应度  $K_a = 1$ , FPD 鉴相  $K_d = 0.8 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1}$ ,可得环路最大相位误差为  $0.089 \text{ rad} \approx 5.1^\circ$ ,当改变发射激光器频率,使其频移按线性趋势变化,环路仍能完成频率捕获与锁相。整体相干通信系统可对  $5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$  调制信号实时解调,误码率为  $1 \times 10^{-7}$ ,这表明本系统可完成光学锁相功能,可应用于星间零差相干光通信系统中。

## 6 结 论

针对导航卫星间相干通信系统,采用多级复合回路的方法设计了一种光学锁相环系统。激光器温度调谐范围为 4 GHz,可满足星间多普勒补偿与跟踪要求。基于 PZT 与 AOFS 调谐组成的内环系统最终实现环路带宽为 1.7 MHz,可实现对窄线宽激光器(千赫兹量级)漂移及相位噪声的有效抑制,最终保证系统稳定工作,从而完成载波同步与基带信号提取,为光锁相环系统的设计与实现提供了参考与依据。系统分析与设计是以 MEO 卫星间的多普勒频移为依据的,如果需要扩大锁相范围,只需对温度控制的外环路进行调整设计即可,理论上可实现十几吉赫兹的锁相范围,可满足 LEO-GEO 之间的多普勒频移补偿应用。

## 参 考 文 献

- [1] Gregory M, Heine F, Kämpfner H, *et al.* Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 031202.
- [2] Liu Y, Tong S F, Chang S, *et al.* Carrier recovery technology of optical phase locked loop in coherent laser communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106001.  
刘洋, 佟首峰, 常帅, 等. 相干激光通信系统光学锁相环路载波恢复技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106001.
- [3] Chang S, Tong S F, Jiang H L, *et al.* Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206004.
- [4] Bloch E, Park H, Lu M Z, *et al.* A 1-20-GHz all-digital InP HBT optical wavelength synthesis IC [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(1): 570-580.
- [5] Camatel S, Ferrero V. Design, analysis and experimental testing of BPSK homodyne receivers based on subcarrier optical phase-locked loop [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(5): 552-559.
- [6] Satyan N, Sendowski J B, Vasilyev A, *et al.* Phase noise reduction of a semiconductor laser in a composite optical phase-locked loop [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(12): 124301.
- [7] Ashtiani F, Aflatouni F. Integrated electro-optical phase-locked loop for high resolution optical synthesis [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16171-16181.
- [8] Nan H, Zhang P, Tong S F, *et al.* Performance analysis of free space coherent optical communication in atmosphere turbulence with tracking error [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 0806003.  
南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析 [J]. *光子学报*, 2015, 44(8): 0806003.
- [9] Zhao X, Niu J P, Liu Y Q, *et al.* Laser communication/ranging integrated technology and link characteristics in navigation satellite system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060601.  
赵馨, 牛俊坡, 刘云清, 等. 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060601.
- [10] Zhang Z, Sun J F, Lu B, *et al.* Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805006.  
张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805006.
- [11] Qu Z, Zhang L, Tong S F, *et al.* Insertion loss characteristics of acousto-optic frequency shifter in optical phase-locked loop and its optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100609.  
曲正, 张磊, 佟首峰, 等. 光锁相环路中声光移频器插入损耗特性研究及优化 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100609.
- [12] Gardner F M. Properties of frequency difference detectors [J]. *IEEE Transactions on Communications*,

- 1985, 33(2): 131-138.
- [13] Lu M Z, Park H, Bloch E, *et al.* Highly integrated optical heterodyne phase-locked loop with phase/frequency detection [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9736-9741.
- [14] Zhang B H, Zhang S H. Tracking system based on photoelectric imaging [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2003: 35-55.
- 张秉华, 张守辉. 光电成像跟踪系统 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2003: 35-55.
- [15] Song Y S, Tong S F, Dong Y, *et al.* Technique of compound axis control using single detector based on field programmable gate array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0406001.
- 宋延嵩, 佟首峰, 董岩, 等. 基于现场可编程门阵列单探测器复合轴控制技术 [J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0406001.