

# 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计

张震<sup>1,2</sup> 孙建锋<sup>1</sup> 卢斌<sup>1,2</sup> 李佳蔚<sup>1,2</sup> 朱韧<sup>1</sup> 侯霞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 光学锁相环(OPLL)是相干激光通信系统中的重要组成部分。设计了科斯塔斯数字光学锁相系统,用于星间相干通信中零差接收和多普勒频移跟踪。锁相系统采用可编程逻辑门阵列(FPGA)作为主控单元,本振激光器(LO)采用调制边带注入锁定的可调谐激光器,中心波长为1550 nm,具有窄线宽和快速调谐的优点。与传统锁相环相比,系统具有更快的频率捕获速度,具有更高的稳定性。实验中,能够实现140 MHz频差范围内的快速锁定,保持锁定时间大于1 h,并能够对20 MHz/s多普勒频移跟踪,为后续星间相干通信实验提供支持。

**关键词** 光通信; 可编程逻辑器件; 光锁相环; 科斯塔斯

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805006

## Costas Optical Phase Lock Loop System Design in Inter-Orbit Coherent Laser Communication

Zhang Zhen<sup>1,2</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Lu Bin<sup>1,2</sup> Li Jiawei<sup>1,2</sup> Zhu Ren<sup>1</sup> Hou Xia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** Optical phase lock loop (OPLL) is an important part in the coherent laser communication system. A Costas digital optical phase lock loop system is designed, which is used in the inter-orbit coherent laser communication and Doppler frequency shift tracking. The system uses field programmable gate array (FPGA) as the central processor. The local laser (LO) is 1550 nm central wavelength sideband modulation injection locking laser, which has high tuning speed and narrow linewidth. Compared with the traditional OPLL, the proposed system provides more stability and frequency acquisition speed. It can achieve phase lock in frequency deviation range of 140 MHz and the phase locked time is longer than 1 h in the experiment. It can also achieve 20 MHz/s Doppler frequency shift tracking and provide the experimental supports for followed-up inter-orbit coherent laser communications.

**Key words** optics communications; field programmable gate array; optical phase lock loop; costas

**OCIS codes** 060.1660; 220.4830; 250.5060

### 1 引言

近年来,对于空间激光通信的研究和应用越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>。与传统的直接强度调制(IM/DD)的激光通信相比,相干激光通信具有灵敏度高,速率快等优点,特别适合星间激光通信和弱信号光的探测<sup>[3-4]</sup>。在相干体制下,二进制相移键控(BPSK)信号调制的零差接收机可实现理论上的最高灵敏度<sup>[5]</sup>,是相干光通信研究的热点。零差接收机要求本振光和信号光的相位严格同步<sup>[6]</sup>,常用的相位同步技术是光学锁相环(OPLL),其种类也有平衡锁相环,科斯塔斯锁相环,同步锁相环等<sup>[7]</sup>。

随着相干激光通信技术的发展,光学锁相系统也在相干接收机中得到应用。2008年,德国 TerraSAR-X

收稿日期: 2015-03-11; 收到修改稿日期: 2015-03-31

作者简介: 张震(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学锁相环方面的研究。E-mail: xdzhangzhen@126.com

导师简介: 侯霞(1975—),女,研究员,硕士生导师,主要从事星载激光遥感及激光雷达方面的研究。

E-mail: hou\_xia@siom.ac.cn(通信联系人)

卫星与美国 NFIRE 卫星实现速率为 5.6 Gb/s 的相干激光通信,在其零差相干接收机中就用了科斯塔斯锁相环进行相位同步<sup>[8-9]</sup>。

星间激光通信存在快速大范围的多普勒频移,传统的锁相环很难在不补偿的情况下完成锁定。可编程逻辑门阵列(FPGA)能够对高速信号进行采集,并能够以百兆赫兹的时钟速率实现多种的数字信号实时处理,其设计灵活,并且带来很短的处理延时,可靠性高。因此,利用 FPGA 完成环路的控制和锁定,可以满足实际应用的需求<sup>[10-11]</sup>。

通过分析并仿真了数字光学锁相环路的特性,建立了数字科斯塔斯光学锁相环锁相系统,成功实现了 140 MHz 频差范围的相位锁定和 20 MHz/s 的多普勒频移跟踪。采用了调制边带注入锁定的可调谐激光器作为本振激光器(LO),并验证了基于该激光器实现锁相的可行性,为后续的相干通信实验提供实验支持。

## 2 星间激光通信多普勒频移估计

星间激光通信时,由于卫星相对位置的运动,光载波的频率会产生多普勒频移,多普勒频移量可以根据  $\Delta f = f \left( \frac{v}{c} \right)$  得到,其中  $\Delta f$  为多普勒频移量,  $f$  为 LO 频率,  $v$  为卫星的相对速度,  $c$  为光速。

图 1 为仿真得到的低轨到高轨卫星的多普勒频移随时间的变化,通信波长为 1550 nm,轨道高度分别为 36000 km 和 500 km。从图 1 可以看到,多普勒频移可达  $\pm 5$  GHz,多普勒频移变化速率最高为 10 MHz/s。

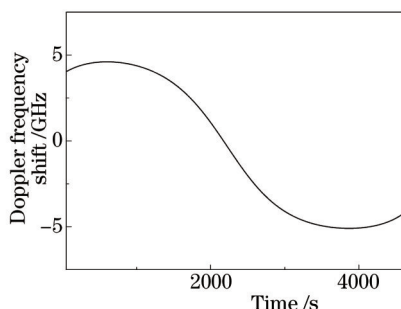


图 1 低轨-高轨卫星激光链路多普勒频移

Fig.1 LEO-GEO inter-satellite laser link Doppler frequency shift

对于如此大范围 and 快速的多普勒频移,通常会根据卫星的轨道和通信波长信息对于频移量进行预测,根据预测结果调节 LO 的频率进行预补偿,补偿过后的多普勒残差约为 30 MHz<sup>[12]</sup>,再利用 OPLL 进行频率和相位的锁定。因此,考虑到激光器的性能,设计环路的频率捕获范围为 140 MHz。

## 3 系统简介

### 3.1 系统结构

图 2 为设计的基于科斯塔斯光学锁相环的锁相系统结构框图,其中红线代表光信号方向,黑线代表电信号方向。

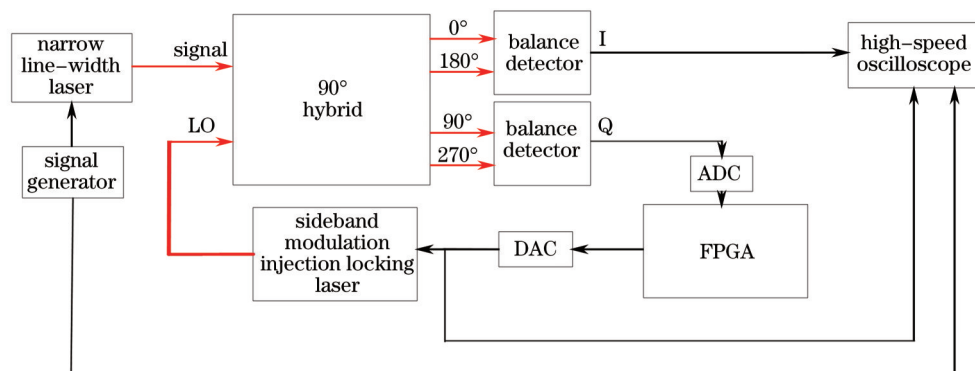


图 2 系统框图

Fig.2 System diagram

信号光由可调谐窄线宽激光器产生,线宽小于 5 kHz,可以通过外部电压进行频率调谐,调谐增益约为 10 MHz/V。与本振光经过 90°光混频器后,分别形成相位差为 0°,90°,180°,270°的四路光,其中 0°和 180°两路光,90°和 270°两路光分别被平衡探测器接收,作为 I 支路和 Q 支路。Q 支路作为误差信号进入环路滤波器, I 支路作为监测信号。环路滤波器由模数转换器(ADC),FPGA,数模转换器(DAC)构成,DAC 输出 LO 的调谐控制电压。LO 采用调制边带注入锁定的可调谐激光器,中心波长为 1550 nm,线宽小于 5 kHz,输出功率大于 16 mW,具有窄线宽和快速调谐的优点。

### 3.2 环路分析与仿真

环路线性化相位模型如图 3 所示。

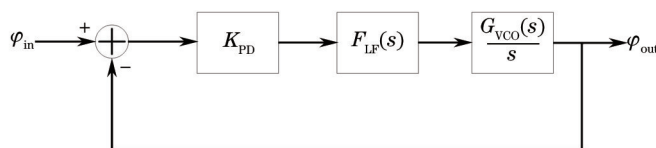


图 3 OPLL 线性化模型图

Fig.3 Diagram of OPLL linearized model

光学锁相环的传递函数一般表示为<sup>[13]</sup>

$$G(s) = K_{PD} \cdot \frac{G_{VCO}(s)}{s} \cdot F_{LF}(s) \cdot \exp(-s\tau), \quad (1)$$

式中  $K_{PD}$  为相位探测灵敏度,  $F_{LF}(s)$  为环路滤波器传递函数,  $G_{VCO}(s)$  为 LO 的传递函数,  $\exp(-s\tau)$  为环路延迟项。

LO 的传递函数由实验测得,其增益为 40 MHz/V。图 4 为所使用的 LO 的频率相位响应图。

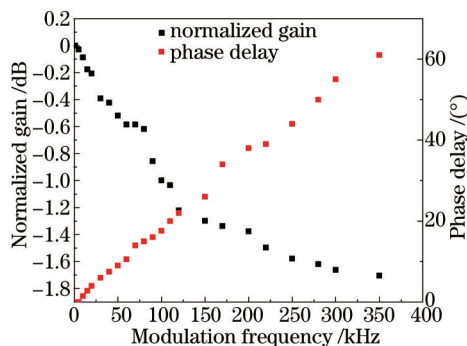


图 4 LO 频率相位响应图

Fig.4 Phase frequency response graph of LO

拟合得到激光器的传递函数为

$$G_{VCO}(s) = \frac{(1 + 1.73 \times 10^{-5}s)}{(1 + 3.55 \times 10^{-7}s)(1 + 1.89 \times 10^{-5}s)} \exp(-3 \times 10^{-7}s), \quad (2)$$

环路滤波器为数字低通滤波器,其 Z 域的传递函数为

$$F_{LF}(z) = \frac{8.235 \times 10^{-4} + 0.03773z^{-1} - 0.08533z^{-2} + 0.05593z^{-3}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}, \quad (3)$$

因此,可以得到锁相环路的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{-4.15s^5 + 6.52 \times 10^6 s^4 + 4.32 \times 10^{13} s^3 + 7.44 \times 10^{18} s^2 + 2.87 \times 10^{23} s + 1.28 \times 10^{14}}{6.7 \times 10^{-12} s^7 + 7.28 \times 10^{-5} s^6 + 261.8 s^5 + 3.18 \times 10^8 s^4 + 1.6 \times 10^{-13} s^3} \times \exp(-3 \times 10^{-7}s). \quad (4)$$

其开环频率响应曲线如图 5 所示。由图 5 中求得该系统的相位裕量为 45°,环路是稳定的。

环路闭环传递函数为  $H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$ 。环路带宽  $B_L = \int_0^\infty |H(j2\pi F)|^2 dF$ ,积分可得设计系统的环路带宽为

74 kHz。锁定过程仿真结果如图 6 所示,其中红线为误差信号,黑线为监测信号。

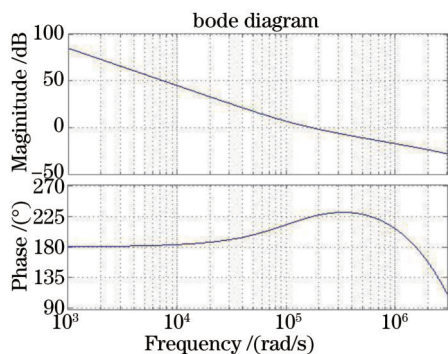


图5 开环频率响应曲线

Fig.5 Bode plot of open loop response

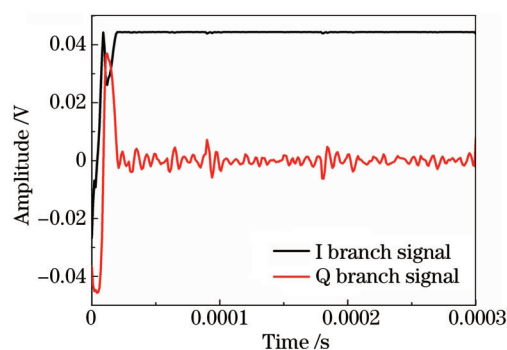


图6 环路相位锁定过程

Fig.6 Process of loop phase locking

## 4 实验结果

### 4.1 锁定过程

开始时, LO 与信号激光器起始频差设定为 70 MHz, 由 FPGA 产生扫频电压信号, 图 7(a)为锁定前信号, 随着电压的增加, LO 与信号激光器的频差不断缩小, 在进入锁相环的捕获带时, 完成锁定。图 7(b)为锁定后的 I 支路信号, 图 7(c)为锁定后 LO 控制电压。

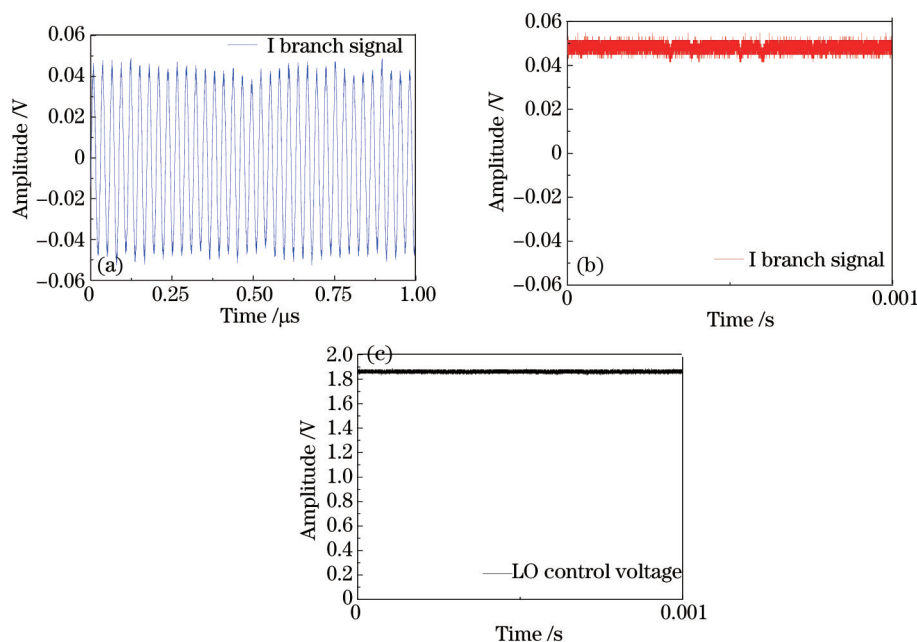


图7 相位锁定过程。(a) 锁定前扫频; (b) 锁定后; (c) 本振激光器控制电压

Fig.7 Process of phase locking. (a) Frequency sweeping before locking; (b) phase locked; (c) LO control voltage

实验中在大于 1 h 的时间内, 环路一直处于锁定状态, 锁定结果与仿真结果基本一致。

### 4.2 多普勒频移跟踪过程

由信号发生器对信号激光器进行正弦调制模拟多普勒频移, 频率调制幅度为 10, 20, 40 MHz, 调制斜率约为 20 MHz/s, 实验结果如图 8(a)~(c)所示。

如图 8 所示, 红色线为信号激光器调谐电压控制信号, 蓝色线为 LO 调谐电压控制信号, 黑色线代表锁定信号。由于信号激光器的频率发生变化, 可以看到, LO 的调谐电压随之发生变化, 变化趋势与信号激光器一致, 而信号仍保持锁定。

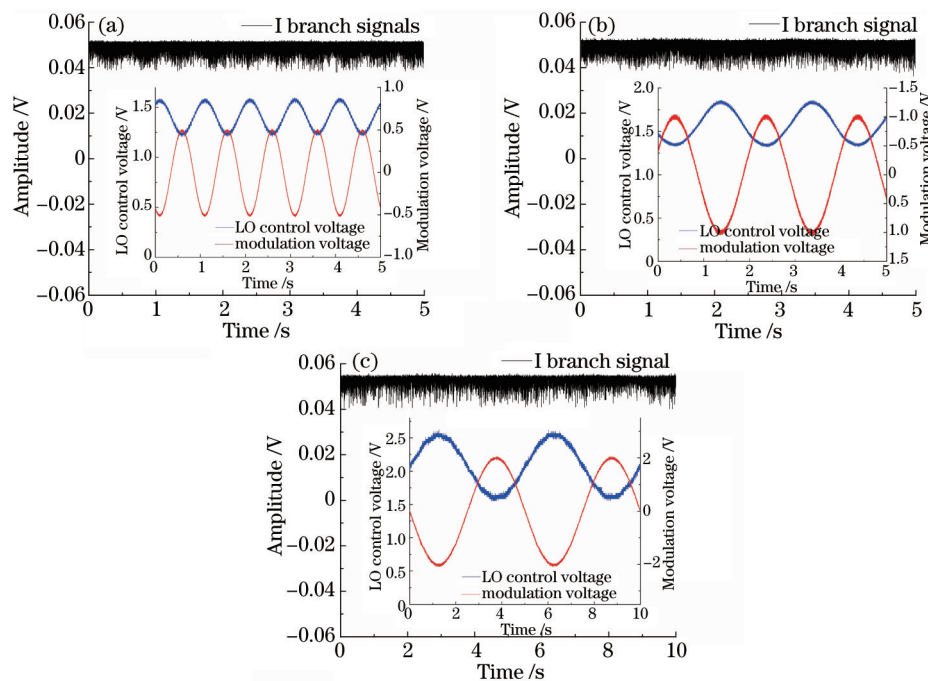


图8 实验结果。(a) 调制幅度为 10 MHz; (b) 调制幅度为 20 MHz; (c) 调制幅度为 40 MHz

Fig.8 Experimental results. (a) 10 MHz amplitude modulation; (b) 20 MHz amplitude modulation; (c) 40 MHz amplitude modulation

## 5 结 论

设计了用于星间相干激光通信的数字科斯塔斯光学锁相系统,采用FPGA作为锁相系统的控制单元,LO采用调制边带注入锁定的可调谐激光器。该锁相系统具有更快的捕获速度和更高的稳定性。在实验中,能够对140 MHz以内的频差快速锁定,保持锁定时间大于1 h,并能够对于信号光产生20 MHz/s的频移快速跟踪,为之后的数据恢复和星间相干激光通信实验提供支持。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Mingjie, Yang Yan, Zhu Ren, *et al.*. Field-programmable-gates-array based pulse position modulation communication system design[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905002.  
林明杰, 杨 燕, 朱 韧, 等. 基于可编程逻辑门器件的高速脉冲位置调制通信系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905002.
- 2 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.  
宋婷婷, 马 晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040004.
- 3 S Varma, M L Rampal. Coherent communication system[J]. Emerging Optoelectronic Technologies, 1991, 1622: 390-393.
- 4 A D Torre, A E Marini, P Musetti, *et al.*. Coherent detection in optical space communication based on diode-pumped Nd lasers technology[C]. SPIE, 1990, 1218: 456-466.
- 5 T Okoshi. Recent progress in heterodyne coherent optical-fiber communications[J]. Lightwave Technology, 1984, 2(4): 341-346.
- 6 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Hou Peipei, *et al.*. Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120002.  
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120002.
- 7 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean, *et al.*. Optical phase locked loops in inter-satellites coherent optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(4): 25-33.  
许 楠, 刘立人, 刘德安, 等. 星间相干光通信中的光学锁相环[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(4): 25-33.
- 8 B Smutny, H Kaempfer, G Muehlnikel, *et al.*. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. SPIE, 2009, 7199: 719906.
- 9 R Lange, B Smutny. Homodyne BPSK-based optical inter-satellite communication links[C]. SPIE, 2007, 6457: 645703.

- 10 T Sakamoto, A Chiba, A Kanno, *et al.*. Digital optical costas loop for coherent demodulation of 10-Gb/s BPSK[C]. OECC, 2010: 766-767.
- 11 K Kudielka, K Prbil. Transparent optical intersatellite link using double-sideband modulation and homodyne reception[J]. AEU International Journal of Electronics and Communications, 2002, 56(4): 254-260.
- 12 T Ando, E Haraguchi, Kenichi Tajima, *et al.*. Coherent homodyne receiver with a compensator of Doppler shifts for inter orbit optical communication[C]. SPIE, 2011, 7923: 792305.
- 13 M Lu, H Park, E Bloch, *et al.*. An integrated 40 Gbit/s optical costas receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2244-2253.

栏目编辑：苏 岑