

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2206132

锁相环技术的研究进展*

张颖 刘婵娣 梁静远 董可 柯熙政
(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要:电锁相环(PLL)在无线通信系统、导航、雷达等领域中都占据相当重要的作用,它影响了整个系统的数据处理速率、时钟相位信息的提取等。光学锁相环(OPLL)具有高速实时接收、功耗低、抗背景光干扰能力强、抗多普勒频移等优势,是相干光通信系统的关键电路模块,其性能直接影响光通信系统性能,光锁相环的研究主要针对其参数进行优化和改进。综述了由电锁相环到光锁相环技术的研究进展,在对其原理和关键组件介绍的基础上,详细介绍了电锁相环和光锁相环的分类和参数指标,比较各类光锁相环的性能,总结了无线光相干通信系统中的光锁相环技术,最后对其未来的发展方向进行展望,可为锁相环技术在不同领域的研究和发展提供参考。

关键词:无线通信;光通信;相干光通信;锁相环

中图分类号: TN911. 8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 50

Research progress of phase-locked loop technology

Zhang Ying Liu Chandi Liang Jingyuan Dong Ke Ke Xizheng
(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Phase-locked loop (PLL) plays an important role in wireless communication navigation, radar and other fields. It affects the data processing rate of the whole system and the extraction of clock phase information. The optical phase-locked loop (OPLL) has the advantages of high-speed real-time reception, low power consumption, strong ability to resist background light interference and Doppler frequency shift, and is the key circuit module of coherent optical communication system. Its performance directly affects the performance of optical communication system. The research of optical phase-locked loop is mainly aimed at optimizing and improving its parameters. This paper reviews the research progress of the technology from electric PLL to OPLL. Based on an introduction to the principle and key components, the classification and parameters of the electric PLL and optical PLL are introduced in detail, and the performance of various optical PLLs is compared. In addition, the OPLL technology applied in coherent optical wireless communication system is summarized, and the future development direction is prospected, which provides a benchmark for research and development of PLL technology in different areas.

Keywords: wireless communication; optical communication; coherent optical communication; phase locked loop

0 引言

传统的锁相环(phase-locked loop, PLL)技术一开始被运用在无线通信的接收系统,它能将接收信号中的某一特定时钟进行相位提取,利用反馈控制方法使本地与

接收端的时钟同步^[1];为接收机和发射机提供最佳的本地载波信号;实现信号调制与解调。电锁相环结构简单,相位噪声性能较好,有广泛的应用。

光学锁相环(optical phase-locked loop, OPLL)是电锁相环在光学领域的拓展,利用了锁相环的频率相位锁定跟踪特性,其实质是在光频段对信号光进行的锁

收稿日期: 2022-12-17 Received Date: 2022-12-17

* 基金项目: 陕西省重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、陕西省教育厅科研项目(18JK0341)、西安市科技创新指导项目(201805030YD8CG14(12))、陕西省重点计划产业创新链项目(2020ZDLGY05-02)资助

相,频率范围变化更大,所以相比于电锁相环,光锁相环对频率捕获的要求更高,且必须具备宽范围、精密鉴相性能等。

光锁相环技术就是最初起源于相干光通信系统^[2-3]。光通信系统中,相干通信与幅度调制/直接探测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)通信方式相比,其在灵敏度上可提高 20~23 dB,且相干通信是带外噪声高抑制的最佳解决方案^[4]。如果信号光和本振光的频率是一致的,那么系统为零差相干通信,反之为外差相干通信^[5]。在零差相干接收中,要求通信系统能够实现对激光频率的精确控制,以保证信号光与本振光的相位完全同步。光锁相环是一种能够使两束光进行相位匹配的闭环控制系统^[6],相比于注入同步锁相或用相位分集接收的方法来消除相位漂移的影响,光学锁相环对信号功率要求较低且接收灵敏度较高,是相干接收机中的关键技术之一。研究零差相干光锁相技术以提高接收系统灵敏度,可通过光锁相选型、关键器件优化选取等方式对影响锁相环性能的因素进行有效抑制,提高锁相环性能。

本文回顾了电锁相环和光锁相环的发展进程,介绍了它们的工作原理以及典型的结构,对比了各类锁相环的特点,主要分析了光锁相环在无线相干光通信中的重要作用,同时讨论了锁相环未来的发展方向。

1 锁相环的发展

1.1 电锁相环的发展

1673 年, Huygens^[7]通过观察钟摆的自发弱耦合的现象,提出了同步振荡器的概念,这就是最早的锁相的概念,受那个时代科学技术发展水平的限制,学术界并没有去重点关注锁相这一概念。1919 年, Vincent^[8]提出了锁相的概念,研究出实现振荡器之间同步的方法。20 世纪 30 年代无线电技术处于发展的初期阶段,锁相环的一些数学理论就已经出现^[9]。1932 年,法国人 Bellesciz^[10]发表了同步检波理论,给出了锁相环的数学描述,并且被应用在同步检波中。1940 年,首次在电视机上应用了锁相环^[11],它可以有效地抑制由于外部噪声干扰而造成的屏幕抖动,提高了图像同步性能,使电视画面更加清楚。随着锁相环技术的发展,到 1947 年,该技术已广泛应用于电视水平同步电路^[12]。20 世纪 50 年代, Jaffe 等^[13]在导弹的跟踪滤波器装置中应用了锁相环技术,同时, Jaffe 和 Rehtin 对包含噪声效应的锁相环路进行了理论的分析,并发表了文章,解决了锁相环路的最佳化设计问题。苏联在 1957 年发了第 1 颗人造地球卫星,同样也是锁相环技术首次被运用在这个领域,利用锁相跟踪接收机才能提取到噪声中的信号,普通的接收技术是无法做到的,这

开启了人类的航天时代^[14]。1965 年,出现了利用模拟电路技术设计的模拟集成锁相环^[15],这使锁相环成为一个低成本的电路。20 世纪 70 年代,出现了数模混合系统的锁相环^[16],其环路结构中的部分电路实现了数字化,而其余的部分仍采用的是模拟电路来完成,数字电路的加入提高了环路稳定性能。1980 年, Gardner^[17]提出的电荷泵锁相环(charge-pump phase-locked loop, CPPLL)就是一种典型的数模混合锁相环。1988 年, Johnson 等^[18]设计了基于 CMOS 电压控制延时的锁相环结构,其具备动态调整时钟周期的功能,提高了环路的稳定性,又增强了系统整体的抗噪声的性能。1993 年, Riley 等^[19]提出了小数分频锁相环结构,提高输出频率精度,这种小数分频是通过把累加器用 $\Sigma-\Delta$ 调制器来代替的方式完成的。2003 年, Staszewski 等^[16]提出了全数字锁相环(all-digital PLL, ADPLL)的完整结构,其数字特性使得它能够达到非常短的锁定时间,这促进了高性能处理器时钟的发展。进入 21 世纪,随着电子通信的发展,锁相环结构也由单环结构向复合环发展,并且向低功耗、高频率和宽范围的方向不断发展。

1.2 光锁相环的发展

自 1964 年 Enlog 等^[20]首次使用 He-Ne 激光器进行激光锁相的实验,光锁相环已经发展了很多种结构的实现方案。

1978 年, Mengali 等^[21]分析了光接收机中光电探测器电流驱动的光锁相环的性能,对脉冲幅度调制以及正弦波调制的环路跟踪特性进行了研究分析,结果发现环路相位误差的方差是相关系统参数的函数。

1983 年, Steele^[22]首次设计了基于 GaAlAs 半导体激光器的外差光锁相环结构,实验测得该光锁相环的锁定范围达到 40 MHz,同时提出了在更高的直流耦合增益下可以实现零差锁相。

1985 年~1986 年, Kazovsky^[23-24]对各种类型的光锁相环展开研究,包括外差判决反馈锁相环、零差平衡探测和零差判决反馈锁相环。

1989 年,德国启动空间固体激光通信计划(solid state laser communication system, SOLACOS)^[25],采用 Costas 光学锁相环作为终端模型,用以实现低轨道卫星到同步轨道卫星之间的单向通信。

1990 年,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)在模拟太空实验条件下演示了基于二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)且传输速率达到 140 Mbps 的 Costas 环的相干接收实验^[26]。

20 世纪 90 年代初,各国进行了各类光锁相环的零差相干探测实验,表 1 所示为具有代表性实验中通信速率与接收机灵敏度数据。

表 1 各类基于光锁相环的研究

Table 1 All kinds of research based on optical phase locked loop

时间	作者	光锁相环类型	通信速率	探测灵敏度 (photons/bit)
1990 年	Kazovsky 等 ^[27]	平衡锁相环	140 Mbit/s 2 Gbit/s	25 332
1990 年	Kahn 等 ^[28]	平衡锁相环	4 Gbit/s	83
1990 年	Schopflin 等 ^[29]	Costas 锁相环	140 Mbit/s 565 Mbit/s	11 21
1990 年	Norimatsu 等 ^[30-31]	Costas 锁相环 判决反馈锁相环	5 Gbit/s 10 Gbit/s	93 297
1991 年	Wandernoth ^[32]	同步位锁相环	565 Mbit/s	20
1992 年	Hornbachner 等 ^[33]	Costas 锁相环	140 Mbit/s	28
2005 年	Herzog 等 ^[34]	三阶振荡锁相环	400 Mbps	36

1991 年,Bopp 等^[35]利用基于 Nd:YAG 固体激光器的接收机,进行了基于 Costas 锁相环的 BPSK 零差相干检测以及差分相移键控(differential phase shift keying, DPSK)的外差探测通信实验,测得传输速率达到了 600 Mbps。

1995 年~1996 年,Huang 等^[36]和 Chiou 等^[37]相继开展了以零差平衡与零差 Costas 环为基础的远距离通信实验,并对光锁相环系统中收光放大器在噪声作用下的性能状况作了理论上的分析。

1996 年,欧洲航天局实施新一代星间相干光通信的项目 SROIL(short range optical inter-satellite link)^[38],该项目中接收机使用的是 BPSK 零差相干技术,在传输距离为 4 000 km 时,接收机的传输速率为 1.5 Gbps,测得误码率约为 10⁻⁹。另外,该项目还进行了中远程星间激光通信实验,接收机也使用了 BPSK 零差相干技术,在传输距离为 6 000 km 时,测得传输速率为 6.5 Gbps。

1999 年,Djordjevic 等^[39]研究了应用于多信道频分复用的基于相移键控(phase shift keying, PSK)的 Costas 锁相环的光外差系统,并且文献中提出的理论和结果可用于分析和优化线性锁相环模型不够好的区域的性能。

1999 年,Kudielka 等^[40]设计了一种将同步位和残余载波优势结合起来的光锁相环接收机,并且在该接收机中不需要复杂的电子设备,在发射机不需要特殊的调制电路。

2002 年,德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt, DLR)与 Tesat 公司共同开展 LCTSX(laser communication terminal for SAR-X)计划,这一项目采用的是激光器波长为 1 064 nm 的 Costas 光锁相环零差相干光通信系统^[41],实验测该系统误码率约为 10⁻⁹。

2004 年,Camatel 等^[42]提出一种新的用于改善判决反馈锁相环的副载波光锁相环,该锁相环是基于外调制方式实现的,相比于基于激光直接调制的光锁相环电路,该光锁相环更易于实际实现。

2005 年,Lange 等^[43]开展了在通信光端机上采用

BPSK 的 Costas 环接收技术的研究,完成了传输速率为 6.75 Gbps,且传输距离为 6 000 km 时,测得误码率为 10⁻⁸ 的通信实验。

2006 年,Camatel 等^[44]利用副载波光锁相环进行幅移键控和相移键控信号的零差相干检测,测试了传输速率为 2.5 Gbit/s 的幅移键控和相移键控相干通信,以及传输速率为 10 Gbit/s 的相移键控传输系统性能。

2007 年,德国 TerraSAR-x 卫星 Lctsx 可在高 514.8 km 的极轨道上环绕地球,LCTSX 上采用的是基于 BPSK 调制方式的零差光锁相环的光相干接收机^[45],其数据传输速率为 5.5 Gbit/s。

2007 年,权爽等^[46]建立了一种新型光锁相环路,这种锁相环是利用压控光脉冲源和光纤的四波混频效应制成,其鉴相器消光比大于 30 dB。

2008 年,Camatel 等^[47]搭建了基于 BPSK 调制的副载波光锁相环零差接收机,还演示了一种基于判决反馈方案的非线性副载波光锁相环,与基于 8B/10B 编码的导频载波接收机相比,该判决反馈接收机的性能提高了 3 dB。

2008 年,美国低轨道(near field inf rared experiment, NFIRE)卫星和德国的 TerraSAR-X 卫星完成了 LEO-LEO 星间的通信试验,该通信系统具有 5.625 Gbps 的传输速率,采用 BPSK 调制 Costas 锁相环零差探测结构^[45]。此后,美国的 NFIRE 卫星又与欧洲地面站进行了星-地间的激光通信,其传输速率达到 5.625 Gbps,这是国际上首次进行的关于星-地间的相干激光通信链路的试验^[48]。

2009 年,欧洲基于 Tesat 激光通信终端(laser communication terminal, LCT)的光学间卫星通信在 LEO 卫星上运行两年多^[49],该通信终端采用基于零差 BPSK 的调制方案,使此激光通信终端在全双工数据速率为 5.625 Gbps 下,测得误码率为 10⁻⁹。

2009 年,Xu 等^[50]提出了一种利用 Costas 环路反馈来检测弱相干态的平衡零差接收机,使用了 BPSK 调制的实验装置,实现了光载波相位跟踪的实验。

2010 年, Sakamoto 等^[51]在副载波光锁相环的基础上,提出了新型数字 Costas 光锁相环的结构,实现对传输速率为 40 Gbit/s BPSK 信号的实时零差解调。

2011 年,日本宇宙航空研究所(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)^[52]设计出新一代基于 BPSK 调制的零差相干接收终端,实现了地球同步轨道 GEO 和 LEO 间激光链路实验,传输速率高达 2.5 Gbps,并且初始频率偏移为 ± 7.5 GHz 时,测得解调灵敏度为 -49.1 dBm。

2011 年, Steed 等^[53]进行了外差光学锁相环实验,实验中使用的是发射波长为 1 553 nm,而线宽为 1.1 MHz 的两台激光器,实验测得它们之间外差信号相位噪声低于 -90 dBc/Hz,频率偏移大于 20 kHz,并且在 10 GHz 带宽内的相位误差方差为 0.04 rad^2 。

2012 年, Lu 等^[54]首次提出了具有相位/频率检测器和单边带混频器的高度集成光学锁相环,通过在光子集成电路上集成 90° 光学混合器件和电子集成电路上集成单边带混频器,在 16.5 GHz 范围内实现了单边带偏移锁定,并测得其环路带宽为 400 MHz。

2012 年, Mizutori 等^[55]用 3 kHz 谱线宽外腔半导体激光器实现 12.5 Gbit/s BPSK 零差判决反馈环的锁相实验,这种锁相环性能使得接收机的灵敏度与数字相干接收机相匹配。

2013 年, JAXA 研究了基于调制方式为 BPSK 的 Costas 环零差相干接收机,该接收机在存在 ± 7.5 GHz 多普勒频移的情况下也具有良好的稳定性,并且成功建立一条通信速率高达 7.2 Gbps 的 GEO-LEO 间的数据链路^[56],其中接收机的灵敏度为 -43 dBm,误码率为 10^{-6} 。

2013 年, Ding 等^[57]研究了一种用于相干激光器的频率锁定的光锁相环装置,在实验中当拍频信号为 6.834 GHz 时,具有 1 Hz 的 -3 dB 带宽。

2014 年, Balakier 等^[58]研究了集成化平衡光锁相环的特性,如可调谐性和长期频率锁定,该光锁相环能够生成可调谐的毫瓦波/THz 波。

2014 年, 岳浩^[59]进行了零差平衡锁相环的相干光通信实验,测得在通信速率为 1.25 Gbps 时,其接收灵敏度为 -51 dBm,且误码率为 9.72×10^{-5} 。

2015 年, Koga 等^[60]基于光同步网络的概念,研究了通信速率达到 20 Gb/s,且调制方式为 QPSK 的 Costas 光锁相环的零差接收机。

2015 年,张震等^[61]设计了基于 Costas 环的数字光学锁相系统,当频差范围在 140 MHz 内,可以实现锁定时间达 1 h 实验,该系统也可以进行 20 MHz/s 多普勒频移的跟踪实验。

2016 年, Wang 等^[62]设计了具有频率判别和控制子回路光锁相,实验测得该光锁相环路能够在 0.2 ms 内实现相位锁定,在 1 kHz 抖动频率下精确跟踪振幅为 $\pm \pi/2$

的正弦相位抖动。

2017 年, Wang 等^[63]演示了一种快速激光频率捕获的基于平衡锁相环的方法,实现了大的初始频差下的锁相实验,当频率捕获范围为 164 MHz,实验测得捕获和锁定时间为 440 ms。

2017 年,常帅等^[64]进行了用于星间高速相干激光通信的光学锁相环技术研究,在采用 BPSK 进行调制的情况下,传输速率为 5 Gb/s 时,实验测得的灵敏度达到了 -41.4 dBm,而接收机误码率为 10^{-7} 。

2018 年, Ashtiani 等^[65]研究了一种集成电光锁相环的高分辨率光频率合成器,该合成器能够在 5 THz 范围内产生 192 THz 的亚赫兹调谐分辨率光信号,且粗调分辨率为 20 MHz,微调分辨率为 1 Hz。

2018 年, Yue 等^[66]为了实现零差检测,采用了改进的 Costas 光学锁相环和数字控制算法抑制相位误差并跟踪多普勒频移,实验结果表明,相位误差造成的接收机灵敏度损失约为 1 dB,并且接收机可以在 100 MHz/s 的速度下跟踪多普勒频移。

2019 年,刘洋^[67]在研究声光移频器的基础上,提出了 Costas 环宽带调谐法,在 10 GHz 捕获范围内,环路带宽为 1.5 MHz,以 1×10^{-8} 为衡量标准,通信速率分别为 10 Gbps 和 5 Gbps 时,测得灵敏度分别为 -38.7 和 -41.4 dBm。

2020 年,王俊尧^[68]设计了基于 Costas 锁相环的多级复合环路的控制系统,完成了通信速率 10 Gbit/s 的 BPSK 信号解调实验,系统误码率优于 10^{-7} ,该系统具备快速捕获的能力。

2021 年,王恒^[69]在实时数据采集和辨识的基础上设计了一种分布反馈半导体激光器的平衡光锁相环,实验测得环路锁定将激光器线宽从 4 MHz 减小到 20 kHz。

2021 年,霍猛^[70]采用零差激光锁相环技术,进行激光脉冲回波的相干检测实验,结果表明,该环路能使脉冲激光和本振激光之间的初始频差降至小于 2 MHz。

2022 年,方付平等^[71]提出在编码合成孔径激光雷达中采用光学锁相环技术,进行了系统自身随机相位噪声抑制实验,该系统工作在 1 550 nm 波段,它的调制带宽为 1.25 GHz。

2 无线通信中的电锁相环

2.1 电锁相环基本结构

锁相环使输出信号与输入参考信号的频率和相位保持同步^[16]。图 1 是锁相环基本电路,包括鉴相器(phase detector, PD)、环路滤波器(loop filter, LPF)、压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)^[72]。为达到时钟倍频的效果,锁相环将分频器(Divider)加在了压控振荡器输

出和鉴相器输入电路之间,有的将其加在参考频率时钟电路之后^[73],可获得较多的输出频点。

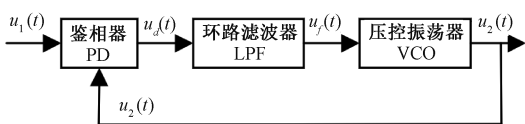


图1 锁相环基本框图

Fig. 1 Schematic diagram of the phase-locked loop

电锁相环工作原理:鉴相器将反馈时钟信号和参考时钟信号进行相位比较^[74],从而得出了相位的偏差信息,此信号通过环路滤波器加以处理后,消除了该信号的高频分量,并生成一个电压信号,该电压信号用于控制压控振荡器的频率。而压控振荡器的输出频率一部分作为输出信号,另一部分作为反馈时钟信号再送入鉴相器^[75],这样就形成了一个完整的锁相环回路。并且环路稳定之后,参考信号和振荡器输出信号的频率相位相匹配。

2.2 电锁相环的分类

1) 按照不同电路结构

(1) 模拟锁相环

模拟锁相环中的各部分皆为模拟电路,图2是模拟锁相环的基本结构,模拟锁相环又被称为线性锁相环(linear phase locked loop, LPLL),这是因为在理想状态下,锁相环稳定工作时,各电路单元都是线性工作的^[76],可以完成没有信号频率误差的捕捉和跟踪。在模拟锁相环中,电荷泵的功能是把上一级输出的信号转换成电荷,对后一级元件中的电容充放电。

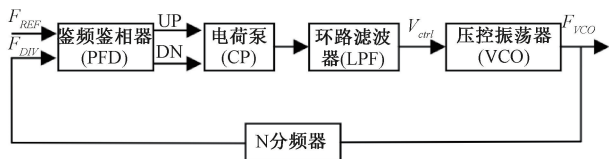


图2 模拟锁相环

Fig. 2 Analog phase-locked loop

(2) 全数字锁相环

全数字锁相环是一种不包含任何无源器件的电路,其结构如图3所示。可以看出,全数字锁相环中,用时间-数字转换器(time-to-digital converter, TDC)比较参考信号和反馈信号的相位,得出相位差信号,并将其转化成数字信号^[77],其量化相位误差功能是全数字锁相环特有的,也可以很容易提取时钟信息^[78]。数字滤波器(digital loop filter, DLF)与整个系统的锁定速度和稳定性密切相关,通过调整滤波器的参数来调节环路的性能。数控振荡器(digitally controlled oscillator, DCO)的控制信号是数

字信号,其产生一个具有特定频率范围的输出信号从而改变输出的振荡频率。

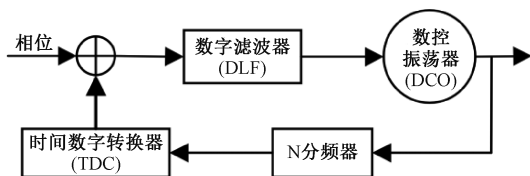


图3 全数字锁相环的结构^[77]

Fig. 3 Three kinds of structure of all-digital phase-locked loop

全数字锁相环中的两类结构。

①I型全数字锁相环:其时间-数字转换器在前向通路中^[79],如图4所示,它是由传统的模拟锁相环发展而来的,技术成熟、动态特性良好、结构简单,适用在需快速捕获频率或者相位的场合。特点是在环路处于锁定的状态的时候,其参考信号与输出信号间存在相位差常数。缺点是带内相位噪声和杂散性能较差。

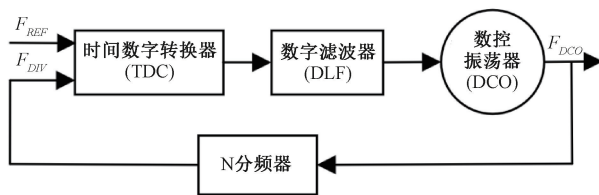


图4 I型全数字锁相环(TDC在前向通路)^[79]

Fig. 4 Type I all-digital phase-locked loop (TDC in forward path)

图4的工作原理:时间-数字转换器比较两输入信号的上升或者下降沿之差,并量化成数字信号输入下一级;数字滤波器采用 IIR 滤波器,即由加法器、D 触发器和移位寄存器构成,功能与环路滤波器类似,去除高频噪声之后,数字滤波器的输出信号用于数控振荡器的输入控制信号;数控振荡器利用 MOS 电容来决定频率的分辨率,而压控振荡器采用变容管的 C-V 特性来实现高精度的调谐功能,数控振荡器通过使用 $\Delta-\Sigma$ 调制器(sigma-delta modulation, SDM),可以达到甚至超过压控振荡器调谐精度;N 分频器的结构一般与模拟锁相环类似,它能够适用于数字电路,将分频后的信号反馈给时间-数字转换器进行比较,重复整个过程,直到全数字锁相环完全锁定。

②II型全数字锁相环:如图5所示,与传统的锁相环在结构上不相同,电路结构多了数字积分器和高速计数器。并且与I型全数字锁相环相比,它将时间-数字转换器放在反馈通路里面,作用是测量数控振荡器和参考时钟上升或者下降沿的相位差,然后转化为数字。它一般应用在时钟恢复领域或者高精度的频率综合,其特点是输出信号与输入参考信号的相位差趋于0,缺点是量化噪声较大,由于高速计数器和时间-数字转换器的输入信

号是数控振荡器输出频率,所以数控振荡器输出消耗的电
流较大,功耗较高,并且这类锁相环的电路设计实现相对
复杂。

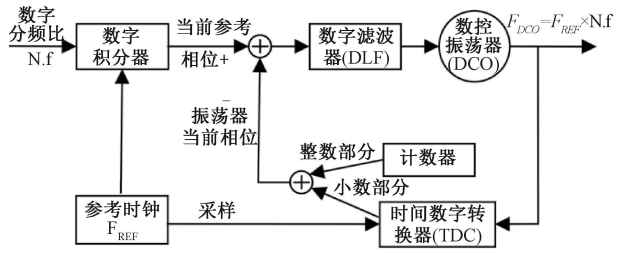


图 5 II 型全数字锁相环(TDC 在反馈通路)^[79]

Fig. 5 Type II all-digital phase-locked loop
(TDC in feedback channel)

图 5 的工作原理:在反馈通路里有一个高速计数器,当参考时钟沿到来的时候,计数器会记录下数控振荡器输出时钟周期的相位整数部分,同时时间-数字转换器则会记录下时钟周期的相位小数部分,则数控振荡器整体的相位数字信号由计数器和时间-数字转换器的输出相加得到。参考时钟的相位利用数字积分器也转换成数字相位信号,再比较这两个输出的数字信号,求出当前相位差的数字值,然后将这个值传入数字滤波器过滤噪声,最后用于数控振荡器的输出频率控制。

(3) 数模混合锁相环

如图 6 所示的电荷泵锁相环(charge-pump phase-locked loop, CPPLL)是数模混合锁相环中的典型^[80],与模拟锁相环相似,唯一的区别是电荷泵锁相环的鉴相器单元采用数字式的电荷泵鉴相器。

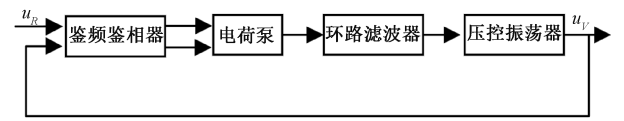


图 6 电荷泵锁相环

Fig. 6 Charge pump phase-locked loop

电荷泵锁相环具有线性范围广、捕获时间短以及锁定相位差小等优势。缺点是其抗干扰性能较差,易受噪声和其他因素影响,且与数字模块的兼容性较差。

(4) 软件锁相环

软件锁相环是由计算机算法生成^[11],采用软件方式实现,参数设计更灵活且结构设计更简单,比其他锁相环具有更好的通用性。软件锁相环的原理与其他锁相环没有太大的差异,只是在数学模型和实现方式上存在差异。软件锁相环采用微秒级计算时间代替其他锁相环中的电子元件。软件锁相环适用于一些要求不高、低频的系统中。

2) 模拟锁相环和数字锁相环的比较

电锁相环可分为模拟锁相环和数字锁相环两大类,其性能对比如表 2 所示。

表 2 模拟锁相环和数字锁相环的比较

Table 2 Comparison of analog and digital phase-locked loop

性能	模拟锁相环	数字锁相环
锁定时间	较长	较短
锁定速度	较快	较慢
抗噪能力	较弱	较强
电路复杂度	较高	较低
可移植性	较差	较好
面积	较大	较小
功耗	相当	相当
抖动性能	较好	与控制字有关
兼容能力	用于数字电路中需要考虑	用于数字电路中无需考虑

模拟锁相环对于具有正弦特性的信号跟踪能力强,它锁定的时间很短,保证了输出时钟与参考时钟之间的稳态相差。模拟锁相环的性能取决于晶体管的尺寸参数,通过复杂的电路结构和牺牲功耗来达到预期的性能。随着工艺尺寸的不断缩小,模拟锁相环的工作频率范围将大幅降低。数字锁相环的扩展性强、移植性好、抗干扰性能优异,并且很容易集成在超大规模的数字电路中^[81]。在不理想的工作环境中,模拟锁相环电路容易受到外界不理想因素的影响,而数字锁相环有效克服了工艺、电压、温度等变化带来的问题^[82]。

3) 其他分类

(1) 不同分频系数的锁相环

根据分频器的分频系数不同,分为整数分频锁相环和小数分频锁相环。

锁相环在未锁定的情况下,鉴频鉴相器比较参考信号 F_{REF} 和经分频后的信号 F_{OUT} ,输出两者之间的相位误差信号。经过反馈,环路可以实现参考信号相位与反馈信号相位保持锁定,因此,参考信号频率必须等于分频后信号的输出频率,则存在压控振荡器输出频率是输入参考频率 N 倍的锁定关系,如式(1)所示:

$$F_{OUT} = N \times F_{REF} \tag{1}$$

这就是整数分频锁相环,如图 7 所示。环路结构简单,噪声性能较好,缺点是整数锁相环的频率分辨率较低,当电路有高精度要求时,无法达到设计要求。

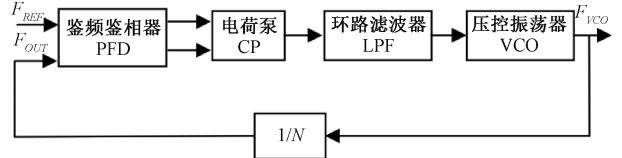


图 7 整数分频锁相环结构框图^[83]

Fig. 7 Schematic diagram of integer frequency division phase-locked loop

若要求输出频率精度更高时,一般选用小数分频型锁相环,如图8所示为基于电荷泵锁相环的结构构造的小数分频锁相环^[83],其电路结构在电荷泵锁相环的基础上多了由 Σ - Δ 调制器控制的双模分频器模块。 Σ - Δ 调制器由1个 Δ 调制器和1个积分器构成,采用该结构,可以得到较高频率分辨率、把低频噪声推到高频处以实现噪声整形或者调制^[84]。

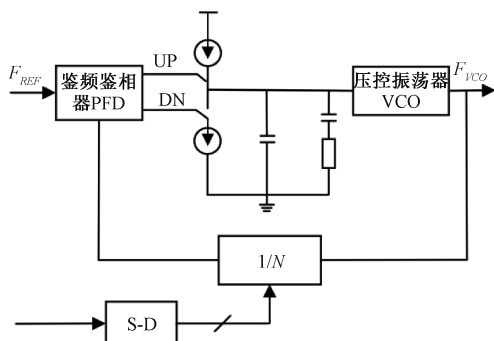


图8 传统的小数分频锁相环^[83]

Fig. 8 Traditional fractional frequency division phase-locked loop

(2) 不同类型数的锁相环

按照环路内积分器的个数划分,即按零点个数划分,分成不同类型的锁相环,锁相环的很多重要性质都与其型数相关。因为压控振荡器进行的就是积分运算,所以锁相环至少是一类的。相比之下,二类锁相环的应用比较多,而由于结构较复杂,3类锁相环偶尔才被应用。

(3) 窄带锁相环和宽带锁相环

窄带锁相环:锁相环窄带和自动跟踪等特性,使得它在接收机中被广泛运用。锁相接收机的工作就是在尽可能消除加性噪声的前提下,对原信号进行正确重构。窄带锁相环输入频率稳定的信号时,本地振荡器只需较少信息就可以进行跟踪^[85]。窄带锁相环主要用于载波同步以及降低数字电路的时钟抖动等应用中。

宽带锁相环:当锁相环环路带宽足够宽时,它才能跟踪输入的信号。宽带锁相环主要用于闭环锁相环频率调制,以及图9所示的运用宽带锁相环解调信号,其中控制电压就是解调输出的信号。

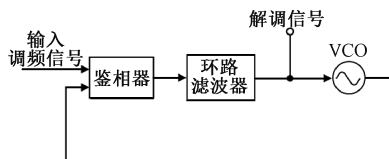


图9 运用锁相环解调信号^[86]

Fig. 9 Demodulation of signal with phase-locked loop

2.3 电锁相环参数指标

1) 频率调谐范围:指锁相环的最小和最大的输出频

率之间的范围,即输出频率的大小,一般会按照通信的标准以及使用的具体场合选择最佳的频率调谐范围以及合适的频段。

2) 频率分辨率:指锁相环所能传递信息的频率的最小间隔。

3) 频率转换时间:锁相环由任意频率变换至另一个频率时所需要的时间必须符合通信系统工作于不同的频段的要求。

4) 相位噪声与杂散:如果以相位噪声作为输出频率的量度,锁相环输出频域内单个频点脉冲是比较理想的情况。但是在实际应用时由于噪声及各种非理想效应等原因,输出的信号会含有其他频率成分,而其他频率成分一般称为杂散。

5) 锁定时间:当锁相环处于稳定运行状态,就称锁相环进入了锁定状态,在不同无线通信系统中,对于锁定时间的长短需求是不一样的。环路带宽低于参考时钟信号频率的1/10,环路稳定性良好^[57]。

2.4 电锁相环的应用

无线光通信脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)调制解调系统中,要求无线光通信系统中的接收机信息检测部分必须与超帧是严格的时间同步关系,才能确保通信系统对脉冲位置调制帧内信息进行正常解调。无线光通信接收机的时隙同步单元如图10所示,主要利用数字锁相环来提取时隙时钟的信号。它的工作过程:首先,输入的窄脉冲信号在幅度比较器中过滤了幅值较低的干扰噪声,接着,该信号通过宽度比较器进行降噪处理,随后将该脉冲信号传输至脉冲展宽器内,由此将该信号的占空比调节成50%,然后再输出相应的电平信号,再经模数转换器(A/D)进行取样,最后被送到数字锁相环中,利用了时钟信号的作用以实现提取同步时隙时钟的工作,保证了无线光通信中的时隙同步。

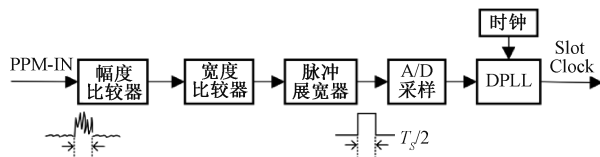


图10 时隙同步器^[87-88]

Fig. 10 Timeslot synchronizer

电锁相环技术还在广播电视、仪器仪表的测量、遥控、国防技术、电子对抗、数字信号处理、机械加工等领域中都占有重要地位。

3 光通信中的光锁相环

3.1 光锁相环的基本结构

光锁相环在实质上和传统电锁相环一样,都是对频

率和相位的闭环锁定电路,特殊之处就是光锁相环是作用于光域范围的控制。图 11 为光锁相环基本电路结构,由 4 个单元组成:光混频器(optical hybrid)、光电探测电路、环路滤波器(loop filter)和可调谐激光器(tunable laser)。光锁相环与电锁相环结构上的不同在于,光锁相环中使用光混频器和可调激光器,等效于电锁相环中的鉴相器和压控振荡器,并且在光混频器之后增加光电探测电路,环路滤波器的作用是一样的,所以,光锁相环和电锁相环在理论分析中本质上是相同的。

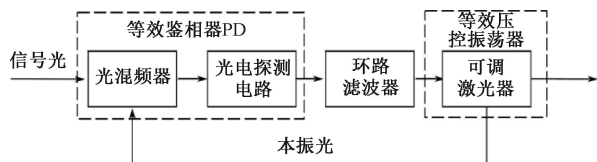


图 11 光锁相环基本结构

Fig. 11 Basic structure of optical phase-locked loop

光锁相环鉴相功能是通过光混频器和前端电路来完成的,在光混频器内,输入的信号光和本振光相干混频^[89],并在光混频器后加入了光电探测电路,把光混频器输出的差频信号转换成电信号,以便环路滤波电路进行滤波积分处理^[69],利用可调谐激光器取代了电锁相环内的压控振荡器^[90],生成一个信号,该信号用以控制本振激光器输出的光频率,并将本振激光器输出信号再反馈到光混频器内,如此反复,以达到闭环控制的目的,在这个过程中,本振激光器的输出频率不断地靠近输入的信号光频率。

1) 光混频器

光混频器按一定相位关系将本振光和输入信号光进行耦合,获得二者的混频光。光混频器主要有 4 路输出光信号的 90°光混频器和 2 路输出光信号的 180°光混频器,并且从能量损失方面考虑,90°光混频器相比于 180°光混频器,其功率低 3 dB。

2) 光电探测电路

光电探测器将光混频器中输出的光相位误差信号转换成相应的电信号。一般使用平衡探测器,由于它能较好地抑制激光器噪声。光电探测电路是利用半导体材料中的电子受光子激发形成了电流。另一类探测器利用物质在光照射下形成光热效应,光子能量作用于晶格之后引起温度上升以及振动增强,使物质的特性发生变化,形成电流。

3) 环路滤波器

环路滤波器在滤除信号中高频分量及噪声的同时,还能通过改变其参数对环路稳定性、捕获时间、环路捕获带宽以及跟踪时间等各项主要性能指标均产生影响。工作原理是利用积分电路把光电探测器的输出转换成相应

的误差反馈电压,在有效调节环路增益和补偿环路相位裕度的同时,低通滤波电路会进一步减小环路噪声。环路滤波器是设计光学锁相环路的关键,地位相当于一般控制系统中的控制算法。

4) 可调谐激光器

可调谐激光器根据信号光与本振光相位差转化成的控制电压来改变输出激光频率。可调谐激光器的线宽、噪声强度、调谐范围等参数对光锁相环的性能有很大的影响,它常被看作线性的电压-频率转化器件。

3.2 光学锁相环的分类

1) 平衡光锁相环

平衡锁相环的结构简单,电路易实现,是其他光锁相环的基础,图 12 为其原理图,具有对称的结构特点。本振光与信号光经 180°光混频器形成 2 路相位差 180°的光信号,该光信号经光电平衡探测器转换为电信号,经跨阻放大器对电信号中的直流分量加以滤波,用环路滤波器消除和校正带有两束光相位误差的电信号,从而产生一个控制本振激光器的信号,当系统处于闭环的状态,本振光与信号光在频率将不断地接近,最终达到本振光与信号光相位同步。

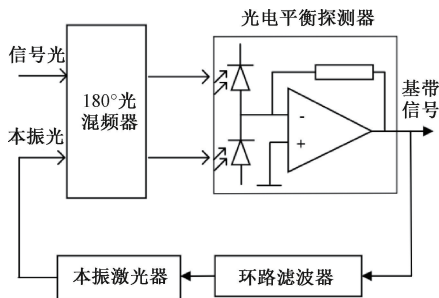


图 12 平衡锁相环^[91]

Fig. 12 Balanced optical phase-locked loop

平衡锁相环内必须存在与本振光互相垂直的残余载波,它才能利用相位偏移生成的电流信号,来控制本振激光器的输出,从而实现相位锁定。此外,由于存在残余载波,其环路要经二次解调才可以输出基带信号。平衡锁相环可以传输模拟,又能处理数字信号,且 180°光混频器的使用使损失功耗最小。激光器线宽与通信速率有关,在误码率为 10^{-10} ,功率损耗为 1 dB 的条件下,其最大线宽与系统的传输码率关系为 $\Delta\nu \leq 5.8 \times 10^{-6} R_b$ ^[91] (R_b 为码率,单位 bit/s)。

2) Costas 光锁相环

Costas 环采用的是 90°光混频器,其结构如图 13 所示,通过将 90°光混频器内本振光与信号光混频,形成了 4 路相位差为 90°的光信号,经光电平衡探测转换后,这 4 路光信号被分在 2 个信号通道,即同相通道和正交通道,这两个通道中携带相位相差 90°的调制信息。对这两通

道的信号进行相乘处理,以消除调制信号,并在此过程中,就会形成2倍频的本振光和信号光之间的相位误差信号。Costas 环本振光和信号光在频率上逐渐接近,并且中频信号也在不断降低,当两者之间的频率相位相等,即环路内的电压是0,从而使环路实现了锁定,此时,在同向支路上的输出即为基带信号。

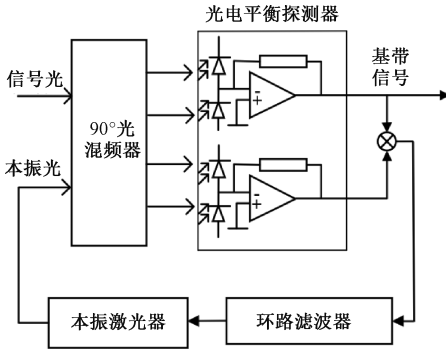
图13 Costas 环^[53]

Fig. 13 Costas optical phase-locked loop

因为 Costas 环采用的是结构复杂的 90° 光混频器,故无需传输残余载波,也没有锁相信号与数据的串扰问题,在环路中采用的是交流耦合元件,能有效地抑制激光器产生的噪声干扰,所以 Costas 环有较高的接收灵敏度。与平衡锁相环相比,90° 光混频器的结构要比 180° 光混频器复杂得多,其实现难度较大,Costas 环既可以处理模拟也可以传输数字信号,它对激光器线宽要求比较低,其最大线宽与系统传输码率关系为 $\Delta\nu \leq 5.02 \times 10^{-4} R_b$ ^[59] (R_b 为码率,单位 bit/s)。

3) 判决反馈光锁相环

判决反馈光锁相环能抑制载波,其结构如图 14 所示,与 Costas 环相比,可发现两者在结构上具有很大相似性,仅在判决反馈锁相环的同相通道增加了数据判决电路单元,该单元由低通滤波电路和阈值比较器组成。而在正交通道上增加了 1 bit 的延时电路,能够补偿因为数据判决而导致两通道信号不同步的问题。虽然加入 1 bit 延时电路,但是,两通道仍很难确保在时间上同步,这会严重影响信号调制的效果。

并且与 Costas 环相比,判决反馈光锁相环具有更小的相位误差,但其只能处理数字信号,其激光器最大线宽与系统传输码率关系: $\Delta\nu \leq 4.5 \times 10^{-4} R_b$ ^[23] (R_b 为码率,单位 bit/s)。

4) 同步位光锁相环

同步位光锁相环的结构简单,其电路如图 15 所示,它可以看作是在平衡锁相环电路结构上添加了信号放大器、数据保持和相位调制。该锁相环采用的是 180° 光混频器来对信号进行光混频处理,并将得到的光信号输入

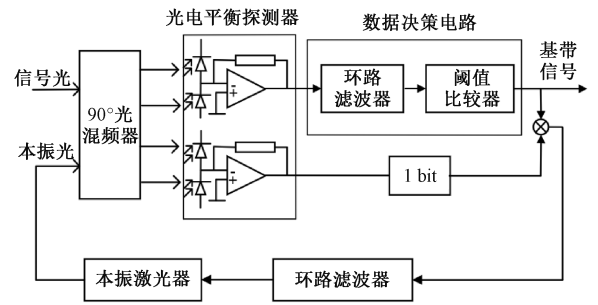
图14 判决反馈光锁相环^[23]

Fig. 14 Decision driver optical phase-locked loop

到光电平衡探测器,经光电变换,再送至锁相电路。在多数情况下,锁相环路是开路状态,它的输出信号是用来进行数据解调的,这种情况下,环路可被看作是 Costas 锁相环中的同相通道。数据传输时,环路是闭合状态,并实现相位锁定。本振激光器的输出端利用相位调制器对本振光的相位进行调整,让光波的初始相位增加 90°,从而实现光电平衡探测器输出信号光相位与前一时刻的相位差为 90°的目的,这个时候的环路可以视为 Costas 环锁相中的正交通道。将两个通道的电信号进行相乘处理,所得即是相位误差信息,然后环路完成锁相,利用信号放大器进行放大滤波,将光电平衡探测器的输出还原成了基带信号。

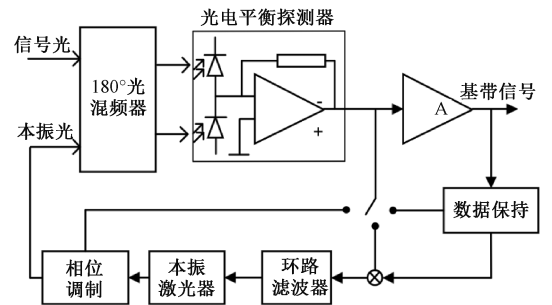
图15 同步位光锁相环^[92]

Fig. 15 Synchronous bit optical phase-locked loop

同步位光锁相环的优点是采用分时方式对输入 180° 光混频器的信号进行相干混频,使其达到 90° 光混频的效果,并利用一个支路就可以完成 Costas 锁相环的工作,减少了系统的复杂性。其缺点是信噪比下降,损失了带宽,由于该锁相环需要对数据进行特殊的编码处理,因此会形成大量冗余信息,如果采用增大通信带宽来解决,又会使噪声增加,如果使用同样的带宽,则会降低传输速率,增大系统对通信带宽的要求,激光器最大线宽与系统传输码率关系为: $\Delta\nu \leq 3.1 \times 10^{-4} R_b$ ^[92] (R_b 为码率,单位 bit/s)。

5) 振荡光锁相环

振荡光锁相环的构造较为复杂,但它适用于多种不同的调制方式,其结构如图 16 所示,其环路内的射频放大器与检波器共同组成增益自动控制模块,该模块对上一级输出的电信号进行调整,并将其调整后的电信号输出到锁相支路中。在本振激光器的电路前面加入了一个振荡源,当它开启之后,所产生的扰动信号将被加到本振光的相位上,在环路未锁定时,其末端能检测出相位误差信号,经过滤波处理后的信号,可以用作控制信号,调节本振激光器,以达到环路锁定的目的。

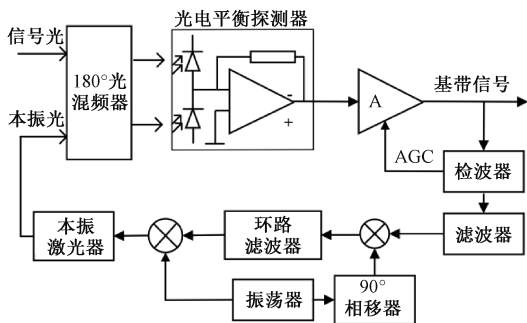
图 16 振荡光锁相环框图^[34]

Fig. 16 Dither optical phase-locked loop

相比平衡锁相环,振荡光锁相环同样可以处理模拟和数字两种信号,并且无需传输残余载波。但是,由于存在额外的振荡信号,必须对其进行相应的信号处理,这使输入信号的平均幅值减小,从而造成了环路功耗增大。激光器最大线宽与系统传输码率关系为: $\Delta\nu \leq 2.6 \times 10^{-4} Rb$ ^[34] (Rb 为码率,单位 bit/s)。

6) 副载波光锁相环

本振激光器在负反馈电路中起着重要作用,通常由压电转换器 (piezoelectric transducer, PZT) 改变激光器的注入电流来实现本振光的相位的调节。但压电转换器的响应时间会限制激光器的调谐带宽。而副载波光锁相环 (subcarrier optical phase-locked loop, SC-OPLL) 电路结构的关键组成模块是光压控振荡器 (optical voltage controlled oscillator, OVCO), 其原理图如图 17 所示,它是由射频压控振荡器 (radio frequency voltage controlled oscillator, RF-VCO)、驱动器 (Driver)、外调制器 (Modulator) 和激光器 (Laser) 构成。

副载波光锁相环不直接控制可调谐激光器,而是通过一个光压控振荡器对本振激光器进行强度调制,由于调制器的非线性导致副载波的产生,这些副载波所引起的相位改变,正是因为控制电压的变化造成的,光压控振荡器的优点是能在射频压控振荡器的基础上实现对副载波光相位的改变,而不需要直接对激光器进行高速的频率调制。副载波光锁相环如图 18 所示,该光学锁相环具有大范围以及快速频率调谐的优点,并且由可调谐激光

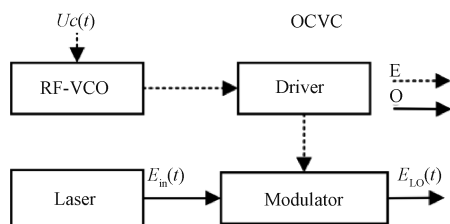


图 17 光压控振荡器原理

Fig. 17 Schematic diagram of optical voltage controlled oscillator

器频率的变化而引起的伪振幅调制,也可以得到避免。激光器最大线宽与系统传输码率关系为: $\Delta\nu \leq 5.8 \times 10^{-6} Rb$ ^[44] (Rb 为码率,单位 bit/s)。

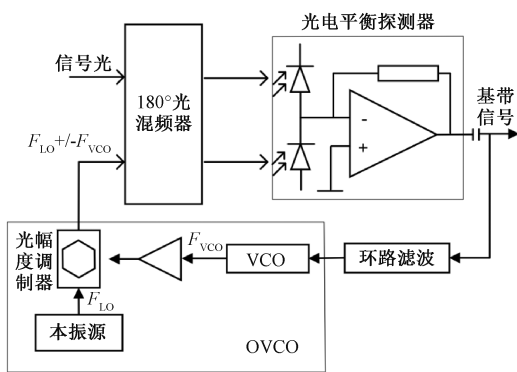
图 18 副载波光锁相环^[44]

Fig. 18 Subcarrier optical phase-locked loop

3.3 光锁相环的参数指标

1) 残余相位误差: 表示输入和输出之间的相位误差方差,它的作用是测量光锁相环系统跟踪信号光的能力,即本振光跟随信号光时产生的相位偏移。

2) 跟踪性能: 在锁定状态下,输出光相位能够稳定地跟踪输入光相位,并且两者之间的误差较小,而当输入光相位变化,输出光对输入光相位进行一定的范围的自动跟踪。跟踪时间长短和稳态误差的大小,都是评价系统跟踪性能优劣的参数。

3) 环路带宽: 是指光锁相环的闭环传递函数的 -3 dB 带宽,也就是本振激光器可以跟踪信号激光器相位的最大宽度。利用环路带宽衡量系统的跟踪性能。环路带宽越大,系统动态性越好,并且环路带宽与系统的稳定性密切相关。

4) 锁定时间: 指当输入光产生阶跃性跳变时,相位误差恢复到 1% 所需的时间。锁定时间应尽可能的小。

5) 捕获带: 光锁相环在不依靠外部手段的情况下,可以自动实现锁定操作的本振光与信号光所能容许的最大初始频差。捕获带过窄会使得本振光不能进行频率拉入动作。

6) 激光器线宽:就是激光光谱的半峰全宽,形成因素主要为激光器受外界因素的干扰,如激发态原子、相位噪声、离子自发辐射、温度抖动等。线宽越低,就表明光谱纯净度越高,因此激光的单色性能越好,相应的,相干性也就越强。

表 3 各种光锁相环性能参数比较

OPPL 类型	平衡环	Costas 环	判决反馈环	同步位环	振荡环	副载波
传输残余载波	是	否	否	否	否	是
90°光混频器	不需要	需要	需要	不需要	不需要	不需要
AC 耦合链路	不允许	允许	允许	允许	允许	不允许
透明链路	是	是	否	否	是	是
激光器线宽	$\leq 5.8 \times 10^{-6}$	$\leq 5.02 \times 10^{-4}$	$\leq 4.5 \times 10^{-4}$	$\leq 3.1 \times 10^{-4}$	$\leq 2.6 \times 10^{-4}$	$\leq 5.8 \times 10^{-6}$
数据类型	模拟、数字	模拟、数字	数字	数字	模拟、数字	模拟、数字
锁相功率可调	否	否	否	否	是	否
特点	激光相噪容纳弱	激光相噪容纳强	只能传输数字信号	需要对数据预处理	要求恒包络调制	OVCO 方案

对几种不同的光锁相结构进行对比,通过对表 3 和前部分内容的分析,可以看出平衡锁相环的结构最为简单,其不需要 90°光混频器。同步位光锁相环需要对传输的数据信号进行预处理,从而引入了额外的比特,导致频谱效率降低。判决反馈锁相环的相位误差较低。振荡锁相环要求恒包络调制,对激光器的线宽要求也较高。Costas 环具有优异的稳定性和较强激光相位噪声的容纳能力,综合性能最佳,应用广泛。光学锁相环的通信速率越高,相应地要求激光器线宽越窄,对激光器线宽要求最低的是 Costas 环,副载波光锁相环可以看作是在平衡光锁相环的基础上增加了光压控振荡器,因此对其的激光器线宽要求同样较高。

4 无线光相干通信中的光学锁相环

4.1 相干光通信的光锁相环

为了满足光通信系统更高的灵敏度、更宽的传输带宽以及更长的传输距离的要求,光的相干调制技术被引入到自由空间的光通信中,由此形成了相干光通信技术,其具有更大的信道容量以及更好的频率选择性^[93],无线光相干通信系统如图 19 所示,其基本原理为:在系统发射端,按所需调制将要传输的光载波的频率和相位,然后,通过大气传输达到接收端之后,在光混频器中完成信号光与本振光的混频,生成了一差频信号,该差频信号携带传递信息,通过光电探测器将获得中频信号,而零差相干探测能直接得到基带信号^[94]。

但是,空间环境极其复杂,信号光与本振光的频率会发生波动,在一定程度上会影响相干光通信的系统性能,也会削弱其优势,而基于光锁相环的相干光通信能对光

3.4 各类光学锁相环性能比较

为了实现高性能的相干光通信,需要综合考虑各种类型的光锁相环的特点、对激光器线宽的要求、传输信号的类别等特性,表 3 所示归纳了各类光学锁相环的主要参数与性能比较。

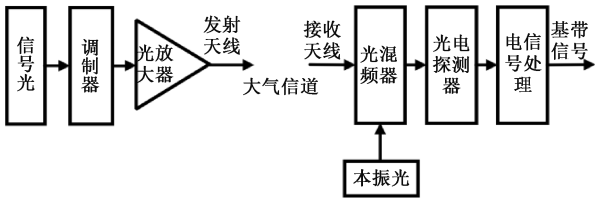


图 19 无线光相干通信系统
Fig. 19 Optical wireless coherent communication system

频率进行有效捕获,还会保持稳定跟踪,其主要应用在对灵敏度和通信速率要求高,而又不能采用光中继,对系统功耗、复杂度等有较高要求的领域,如高速光传输网络和星间光通信等系统。

相干光通信系统中,利用光锁相环实现了接收机对光学相位跟踪,在一定程度上保证了信号光与本振光混频时的严格匹配,以确保信号的相干解调,图 20 所示为无线光相干探测过程中使用光学锁相环的原理图,且零差相干探测具有直接得到基带信号的优势^[88],光锁相环对相干光通信系统至关重要。

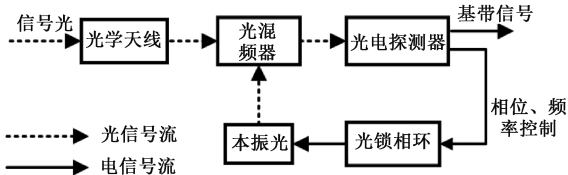


图 20 相干光通信系统中的光锁相环
Fig. 20 Optical phase-locked loop in coherent optical communication system

光锁相环技术是在光域对信号进行相干接收和解

调,直接恢复出数据信号。当输入信号光和本振光的固有频率差在一定范围内,光锁相环能确保本振光信号相位与输入光信号相位的差始终维持在一个固定的、有限的区间,这种由光锁相环控制的过程,叫做捕捉过程;当信号光与本振光信号的相位差是稳定的,即同步状态或锁相状态;而相位差随时间逐渐增大,则处于失锁状态。图 20 中零差相干探测的工作原理:接收天线接收的信号光和本振光进入光混频器,完成混频处理,所获得的中频信号由光电探测电路转换成相应的电信号,再将该电信号反馈给光锁相环,实现本振光频率的快速调谐、光相位同步与信号解调。

表 4 无线光相干通信中光学锁相环的典型应用

Table 4 Typical applications of optical phase locked loop in optical wireless coherent communication						
年份	国家	工作波长/nm	通信速率	调制格式	接收方式	实验条件
1989 年	德国 SOLACOS ^[25]	1 064	600 Mbit/s	BPSK	Costas 锁相环零差相干解调	地面端模拟 LEO-GEO
1996 年	欧洲 SROIL ^[38]	1 064	1.5 Gbit/s	BPSK	同步位锁相环零差相干解调	地面端模拟 LEO 卫星间
2008 年	美国 NFIRE 卫星与 德国 TerraSAR-X ^[45]	1 064	5.625 Gbit/s	BPSK	Costas 锁相环零差相干解调	LEO-LEO 星间
2011 年	日本 JAXA ^[52]	1 064	2.5 Gbit/s	BPSK	Costas 锁相环零差相干解调	地面端模拟 GEO-LEO
2013 年	日本 JAXA ^[56]	1 064	7.2 Gbit/s	BPSK	Costas 锁相环零差相干解调	地面端模拟 GEO-LEO
2017 年	国内电子科大 ^[59,63]	1 064	1.25 Gbit/s	BPSK	平衡锁相环零差相干解调	地面端模拟
2018 年	国内中科院 ^[61,66]	1 550	1 Gbit/s	BPSK	Costas 锁相环零差相干解调	地面端模拟

此外,光锁相环在光调频连续波测量、面向地球重力场测量的高稳定时延模拟、大动态光纤传输链路、精密测量如光谱分析等领域都有重要作用。

5 结 论

本文介绍了无线通信中的电锁相环和无线光相干通信中的光学锁相环,综述了它们的研究进展,总结了它们的工作原理、典型结构以及各类锁相环的特点。重点分析了光学锁相环技术在相干光通信中的关键作用,它在提高光通信系统的通信质量,增加信息传输的安全性方面起到了很大的作用,因此具有重要的研究价值。

在追求高灵敏度、高传输速率、高频谱效率相干光通信的推动下,光学锁相环的类型会更加丰富。并且随着光电技术的发展以及器件工艺的不断提高,锁相环在众多新兴研究领域都有非常广阔的应用前景,为了使锁相环技术更好的应用于实际中,可以进一步的改善和优化其性能,总结为以下几点。

- 1)对混频效率与锁相环误差、环路带宽等之间的关系作进一步研究,从而全面改善锁相环的综合性能^[69]。
- 2)改进鉴频捕获电路,优化捕获算法方案,对锁相环

4.2 光锁相环的典型应用

基于光锁相环的零差相干探测系统的抗干扰能力强、传输距离更远、兼容 DPSK、QPSK 等多种调制格式,随着基于光锁相环的零差相干探测研究的不断深入,各国先后开展了空间光通信计划,并取得了一定的成果,表 4 列出了无线光相干通信中光锁相环的典型应用,为无线光的相干通信提供了有力的参考。可以预见,随着通信容量的扩大、传输速率的提高以及超远距离的需求,基于光锁相环的零差相干光通信技术依然是各国实现空间光传输的理想选择。

路中频差控制精度进行提高,减少环路的频率的捕获时间以实现锁相环的快速锁定,并且增加环路频率的捕获范围^[70]。

- 3)拓展光锁相环的环路增益自动调整功能,进一步改善系统鲁棒性和控制精度,提高系统通信性能^[68]。
- 4)优化环路滤波器的参数及电路设计,实现光锁相环路的高精度锁相性能,提高对弱光的锁定能力,更精确消除电路中的自激振荡信号^[67]。
- 5)优化系统中的环路延时,增加环路带宽来保证锁相环路对宽带的相位噪声进行有效抑制,同时要保证一定相位裕度。
- 6)优化本振光和信号光的温度控制系统,提高温控精度,使激光谐振腔的温度更加稳定,减小频率漂移^[70]。
- 7)发展光锁相环实现全集成化以降低环路延时,使光锁相环的噪声性能和动态特性得到进一步提升,同时减小整个系统的体积重量^[69]。

参考文献

[1] 金玲玲,王新君,孙威. 基于 STM32 的频率合成及其存储设计研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(5): 115-121.

JIN L L, WANG X J, SUN W. Research on frequency

- synthesis and storage design based on STM32 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(5):115-121.
- [2] WANG Y X, YAN S H, HUO M, et al. Phase locking and homodyne detection of repetitive laser pulses [J]. Optics Express, 2020, 28(24):35588-35601.
- [3] SHOJI Y, FICE M J, TAKAYAMA Y, et al. A pilot-carrier coherent LEO-to-ground downlink system using an optical injection phase lock loop (OIPLL) technique [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(16):2696-2706.
- [4] 杨尚君, 柯熙政. 相干光通信中载波频率稳定控制 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4):60-66.
- YANG SH J, KE X ZH. Carrier frequency stability control in coherent optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4):60-66.
- [5] WU J L, KE X Z, YANG S J, et al. Effect of multi-beam propagation on free-space coherent optical communications in a slant atmospheric turbulence [J]. Journal of Optics, 2022, 24(7):075601.
- [6] RAZAVI B. A 2-GHz phase-locked loop [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1997, 32(5):730-735.
- [7] HUYGENS C. Horologium Oscillatorium [M]. Paris: F. Muguet, 1673.
- [8] VINCENT J H. On some experiments in which two neighboring maintained oscillatory circuits affect a resonating circuit [J]. Proceedings of the Physical Society of London, 1919, 32(2):84-91.
- [9] NAGARAJ K, KAMATH A S, SUBBURAJ K, et al. Architectures and circuit techniques for multi-purpose digital phase lock loops [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(3):517-528.
- [10] BELLESCIZE H D. La réception synchrone [J]. L'Onde Électrique, 1932, 11:230-240.
- [11] BRILKA J, KEIBEL J. A new single-reference VIF/SIF/PLL for multistandard signal detection in TV sets and VCRs [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1995, 41(1):23-29.
- [12] PERISIC D, BOJOVIC M. Multipurpose time recursive phase locked loop [J]. Revue Roumaine Des Sciences Techniques, 2016, 61(3):283-288.
- [13] JAFFE R, RECHTIN E. Design and performance of phase-lock circuits capable of near-optimum performance over a wide range of input signal and noise levels [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1955, 1(1):66-76.
- [14] AN C Y, RYU H G. Compensation system design and comparison of very high Doppler frequency effect [J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2019, 108(2):879-894.
- [15] ABRAMOVITCH D Y. Analog phase locked loop [J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(12):2197-2202.
- [16] STASZEWSKI R B, LEIPOLD D, MUHAMMAD K, et al. Digitally controlled oscillator (DCO)-based architecture for RF frequency synthesis in a deep-submicrometer CMOS Process [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2003, 50(11):815-828.
- [17] GARDNER F. Charge-pump phase-lock loops [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(11):1849-1858.
- [18] JOHNSON M G, HUDSON E L. A variable delay line PLL for CPU-coprocessor synchronization [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1988, 23(5):1218-1223.
- [19] RILEY T A D, COPELAND M A. Delta-sigma modulation in fractional-N frequency synthesis [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1993, 28(5):553-559.
- [20] ENLOE L H, RODDA J L. Laser phase-locked loop [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(2):165-166.
- [21] MENGALI U, PEZZANI E. Tracking properties of phase-locked loops in optical communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1978, 26(12):1811-1818.
- [22] STEELE R C. Optical phase-locked loop using semiconductor laser diodes [J]. Electronics Letters, 1983, 19(2):69-71.
- [23] KAZOVSKY L G. Decision-driven phase-locked loop for optical homodyne receivers: Performance analysis and laser linewidth requirements [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(12):2630-2639.
- [24] KAZOVSKY L G. Performance analysis and laser linewidth requirements for optical PSK heterodyne communications systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(4):415-425.
- [25] PRIBIL K, KRIEGER J, MEIER C. High data rate inter-satellite-communication system SOLACOS [J]. Space Communications, 1998, 15(2):97-104.
- [26] FURCH B, SODNIK Z, LUTZ H. Optical communications in space-a challenge for Europe [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2002, 56(4):223-231.
- [27] KAZOVSKY L G, ATLAS D A. A 1320 nm experimental optical phase-locked loop: Performance investigation and PSK homodyne experiments at 140 Mb/s and 2 Gb/s [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(9):1414-1425.

- [28] KAHN J M, GNAUCK A H, VESELKA J J, et al. 4 Gb/s PSK homodyne transmission system using phase-locked semiconductor lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1990, 2(4):285-287.
- [29] SCHOPFLIN A, KUGELMEIER S, GOTTWALD E, et al. PSK optical homodyne system with nonlinear phase-locked loop [J]. Electronics Letters, 1990, 26(6):395-396.
- [30] NORIMATSU S, IWASHITA K, SATO K. PSK optical homodyne detection using external cavity laser diodes in Costas loop [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1990, 2(5):374-376.
- [31] NORIMATSU S, IWASHITA K, NOGUCHI K. 10 Gbit/s optical PSK homodyne transmission experiments using external cavity DFB LDs [J]. Electronics Letters, 1990, 10(26):648-649.
- [32] WANDERNOTH B. 1064 nm, 565 Mbit/s PSK transmission experiment with homodyne receiver using synchronisation bits [J]. Electronics Letters, 1991, 27(19):1692-1693.
- [33] HORNBACHNER D F, SCHREIBLEHNER M A, LEEB W R, et al. Experimental determination of power penalty contributions in an optical Costas-type phase-locked loop receiver [C]. Free-Space Laser Communication Technologies. SPIE, Los Angeles, CA, 1992, 1635:10-18.
- [34] HERZOG F, KUDIELKA K, ERNI D, et al. Optical phase locked loop for transparent inter-satellite communications [J]. Optics Express, 2005, 13(10):3816-3821.
- [35] BOPP M, HUETHER G, SPATSCHECK T, et al. BPSK homodyne and DPSK heterodyne receivers for free-space communication with Nd: Host lasers [C]. Optical Space Communication. SPIE, Munich, Germany, 1991, 1522:199-209.
- [36] HUANG C, WANG L. Optimum phase deviations between mark and space-state bits in long-haul communication systems with balanced PLL receivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(10):1963-1970.
- [37] CHIOU Y, WANG L. Effect of optical amplifier noise on laser linewidth requirements in long haul optical fiber communication systems with Costas PLL receivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(10):2126-2134.
- [38] LUTZ H. ESAs activities towards a short-range laser communications terminal [J]. Space Communications, 1998, 15(2):71-78.
- [39] DJORDJEVIC I B, STEFANOVIC M C. Performance of optical heterodyne PSK systems with Costas loop in multichannel environment for nonlinear second-order PLL model [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(12):2470-2479.
- [40] KUDIELKA K H, KLAUS W. Optical homodyne PSK receiver: Phase synchronization by maximizing baseband signal power [C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society. IEEE, 1999, 1:295-296.
- [41] 刘磊, 肖江南, 唐进, 等. 相干光差分正交相移键控系统中改进的 Gardner 定时恢复方法实验研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(4):23-29.
- LIU L, XIAO J N, TANG J, et al. Experimental research on timing recovery of a differential quadrature phase shift keying coherent optical transmission system based on an improved Gardner algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4):23-29.
- [42] CAMATEL S, FERRERO V, GAUDINO R, et al. Optical phase-locked loop for coherent detection optical receiver [J]. Electronics Letters, 2004, 40(6):384-385.
- [43] LANGE R, SMUTNY B. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: Heritage, status and outlook [C]. Free-Space Laser Communication Technologies. SPIE, San Jose, CA, 2005, 5127:1-12.
- [44] CAMATEL S, FERRERO V. Homodyne coherent detection of ASK and PSK signals performed by a subcarrier optical phase-locked loop [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2006, 18(1):142-144.
- [45] ROMEISER R, RUNGE H. Theoretical evaluation of several possible along-track InSAR modes of TerraSAR-X for ocean current measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1):21-35.
- [46] 权爽, 姚敏玉, 张洪明, 等. 利用光锁相环路实现 40 Gb/s 时钟恢复 [J]. 光学学报, 2007, 27(8):1382-1386.
- QUAN SH, YAO M Y, ZHANG H M, et al. 40 Gb/s clock recovery based on optical phase-locked loop [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8):1382-1386.
- [47] 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.
- [48] SODNIK Z, FURCH B, LUTZ H. Optical Intersatellite Communication [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5):1051-1057.
- [49] RISTIC S, BHARDWAJ A, RODWELL M J, et al. An optical phase-locked loop photonic integrated circuit [J].

- Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (4): 526-538.
- [50] XU Q, MONDRAGÓN A A, GALLION P, et al. Homodyne in-phase and quadrature detection of weak coherent states with carrier phase tracking [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(6): 1581-1590.
- [51] SAKAMOTO T, CHIBA A, KANNO A, et al. Real-time homodyne reception of 40 Gb/s BPSK signal by digital optical phase-locked loop [C]. European Conference on Optical Communication. IEEE, Torino, Italy, 2010: 1046-1048.
- [52] ANDO T, HARAGUCHI E, TAJIMA K, et al. Homodyne BPSK receiver with Doppler shift compensation for inter satellite optical communication [C]. Space Optical Systems and Applications. IEEE, Santa Monica, CA, 2011: 279-285.
- [53] STEED R J, POZZI F, FICE M J, et al. Monolithically integrated heterodyne optical phase-lock loop with RF XOR phase detector [J]. Optics Express, 2011, 19 (21): 20048-20053.
- [54] LU M, 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.
- [55] MIZUTORI A, SUGAMOTO M, KOGA M. 12.5 Gbit/s BPSK stable optical homodyne detection using 3 kHz Spectral linewidth external-cavity laser diode [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communications. IEEE, Amsterdam, 2012: 1046-1048.
- [56] ANDO T, HARAGUCHI E, TAJIMA K, et al. Optical homodyne BPSK receiver with Doppler shift compensation for LEO-GEO optical communication [C]. Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. IEEE, Kyoto, Japan, 2013: 279-285.
- [57] DING X, SANG L, CHEN Z, et al. High precision 6.8GHz phase locking of coherent laser beams for optical lattice experiment [C]. Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. International Conference on Optical Instruments and Technology, 2013: 1-7.
- [58] BALAKIER K, FICE M J, PONNAMPALAM L, et al. Monolithically integrated optical phase lock loop for microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3893-3900.
- [59] 岳浩. 基于 90° 光混频器的零差相干光通信技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- YUE H. Research on homodyne coherent optical communication technology based on 90° optical mixer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [60] KOGA M, SHIGETA Y, SHIRAZAWA F, et al. Costas loop homodyne detection for 20 Gb/s QPSK signal on the optical frequency synchronous network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4752-4760.
- [61] 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): 177-182.
- ZHANG ZH, 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): 177-182.
- [62] WANG Y, LI B, GUO Y, et al. Tracking performance of optical phase locking loop with frequency discrimination and control subloop [J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 1-7.
- [63] WANG Y, WANG C, TAO Y, et al. Fast frequency acquisition and phase locking of nonplanar ring oscillators [J]. Applied Sciences, 2017, 7(10): 1032.
- [64] 常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 76-84.
- CHANG SH, TONG SH 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): 76-84.
- [65] ASHTIANI F, SANJARI P, IDJADI M H, et al. High-resolution optical frequency synthesis using an integrated electro-optical phase-locked loop [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(12): 5922-5932.
- [66] YUE C, LI J, SUN J, et al. Homodyne coherent optical receiver for intersatellite communication [J]. Applied Optics, 2018, 57(27): 7915-7923.
- [67] 刘洋. 基于 AOFS 调谐的星间零差相干激光通信探测技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- LIU Y. Research on inter-satellite homodyne coherent laser communication detection technology based on AOFS tuning method [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [68] 王俊尧. 空间相干激光通信中光学锁相环快速捕获技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- WANG J Y. Research on fast acquisition technology of optical phase locked loop in space coherent laser communication [D]. Changchun: Changchun University of Science And Technology, 2020.
- [69] 王恒. 分布反馈半导体激光器自注入和光锁相环锁定

- 研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- WANG H. Research on self-injection and optical phase-locked loop locking of distributed feedback semiconductor laser[D]. Changchun: Changchun University of Science And Technology, 2021.
- [70] 霍猛. 激光脉冲回波的高灵敏度零差相干探测[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- HUO M. High-sensitivity homodyne coherent detection of laser pulse echo[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [71] 方付平, 胡恒, 鄢朋朋, 等. 基于光学锁相环的编码合成孔径激光雷达系统设计与实验验证[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 136-143.
- FANG F P, HU H, YAN P P, et al. Design and experimental verification of coded synthetic aperture lidar system based on optical phase-locked loop[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 136-143.
- [72] 史建伟, 史永丽. 旋转变压器滑模变结构数字转换算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 180-185.
- SHI J W, SHI Y L. Sliding-mode variable-structure algorithm for resolver-to-digital conversion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 180-185.
- [73] 任雪玉, 黄垚, 薛梓, 等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 25-34.
- REN X Y, HUANG Y, XUE Z, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating Moiré signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 25-34.
- [74] NANDA U. A novel error detection strategy for a low power low noise all-digital phase-locked loop [J]. Journal of Low Power Electronics, 2016, 12(1): 30-34.
- [75] 郑贤, 周帅, 时慧. 小型化低成本频率合成器设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6): 82-86.
- ZHENG X, ZHOU SH, SHI H. Design of miniaturized low-cost frequency synthesizer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6): 82-86.
- [76] SINGHAL N, HASAN S M R. A novel mm-wave analog phase shifter employing closed-loop error-feedback self-tuning I/Q generation [J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2022, 32(7): 887-890.
- [77] YOUNG H S, SEON K L, JAE Y S. A 1 GHz digital PLL with a 3 ps resolution floating-point-number TDC in a 0.18 μm CMOS [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2011, 58(2): 70-73.
- [78] 郭围围, 尹勇生, 龚号, 等. 基于时间放大技术的时间数字转换器的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 98-105.
- GUO W W, YIN Y SH, GONG H, et al. Design of time-to-digital converter based on time amplifier[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 98-105.
- [79] TAKASHI T, MITSUJI O, MASAKI K, et al. A 2.1-to-2.8 GHz low-phase-noise all-digital frequency synthesizer with a time-windowed time-to-digital converter[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(12): 2582-2590.
- [80] WANG X, KENNEDY M P. A random pulse modulation approach to modeling the flicker and white noise of the charge pump of a fractional-N frequency synthesizer [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(4): 1049-1063.
- [81] LEE S K, SEO Y H, PARK H J, et al. A 1 GHz ADPLL with a 1.25 ps minimum-resolution sub-exponent TDC in 0.18 μm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(12): 2874-2881.
- [82] MURMANN B. Digitally assisted analog circuits [J]. IEEE Micro, 2006, 26(2): 38-47.
- [83] RILEY T A D, COPELAND M A, KWASNIEWSKI T A. Delta-sigma modulation in fractional-N frequency synthesis [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1993, 28(5): 553-559.
- [84] YU J, MALOBERTI F. A low-power multi-bit $\Delta\Sigma$ modulator in 90 nm digital CMOS without DEM [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12): 2428-2436.
- [85] GARDNER F M. Phaselock techniques [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1984, 14(1): 170-171.
- [86] NIDHI N, PAMARTI S. Design and analysis of a open-loop modulator for phase modulation and frequency synthesis using TDC-based calibration [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(10): 3975-3988.
- [87] 柯熙政, 赵黎, 丁德强. 一种大气激光通信中时隙同步和帧同步的实现[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 721-724.
- KE X ZH, ZHAO L, DING D Q. The achievement of time-slot and frame synchronization in atmosphere laser communication [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(5): 721-724.
- [88] 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J]. 光电工程, 2022, 49(3): 3-21.
- KE X ZH, LIANG J Y, XU D SH, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical

- wireless communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(3): 3-21.
- [89] WU J L, KE X Z, DING D Q, et al. Design of 90 deg hybrid based on birefringent crystal for coherent optical communication system [J]. Optics Engineering, 2021, 60(4): 045106.
- [90] 陈泳锟, 于涛, 隋延林. 基于 LQR 的激光器锁相控制器设计和噪声抑制分析 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 56-60.
- CHEN Y K, YU T, SUI Y L. Design and noise analysis of phase-locked controller based on LQR [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1): 56-60.
- [91] KAZOVSKY L. Balanced phase-locked loops for optical homodyne receivers: Performance analysis, design considerations, and laser linewidth requirements [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(2): 182-195.
- [92] GLATT W, SCHREIBLERHNER M A. Optical PSK homodyne system using a switched residual carrier for phase synchronization [J]. Electronics Letters, 1996, 32(15): 1386-1387.
- [93] 高晓梅, 邢甜, 高婉倩, 等. 无线光相干通信及其实验研究 [J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 37-45.
- GAO X M, XING T, GAO W Q, et al. Wireless optical coherent communication and its experimental research [J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(4): 37-45.
- [94] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信 [M]. 北京: 科学出版

社, 2016.

KE X ZH, DENG L J. Optical Wireless Communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.

作者简介



张颖, 2004 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2012 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院讲师, 主要研究方向为无线光通信。
E-mail: zhangying@xaut.edu.cn

Zhang Ying received her B. Sc. degree from Xidian University in 2004, and Ph. D. degree from Xidian University in 2012. Now she is a lecturer at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology. Her main research interest includes optical wireless communication.



柯熙政 (通信作者), 1996 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授, 主要研究方向为无线光通信理论与技术。
E-mail: xzke@263.net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.