

空间激光通信中光学锁相环的研究进展

赵毅^{1,2,3} 佟首峰^{1,2} 宋延嵩^{1,2} 常帅^{1,2,3} 刘洋^{1,2,3}

¹长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

²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

³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 相干探测技术可以有效提高零差接收机的灵敏度。在空间激光通信系统中,零差接收机要求信号光和本振光的相位严格同步,光学锁相环是最常用的相位同步技术。介绍了对光学锁相环的理论模型,推导出相应的传递函数,同时指出了影响光学锁相环性能的主要参数,如环路噪声带宽、自然频率和阻尼比等。详述了各类光学锁相环的基本结构和特性,其中包括:平衡锁相环、Costas锁相环、同步位锁相环、振荡锁相环以及副载波锁相环,并对各类光学锁相环的性能进行了比较。总结了光学锁相环近年来的发展及应用,最后对该技术的前景进行了展望。

关键词 光通信;空间激光通信;相干探测;光学锁相环;副载波锁相环

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080002

Research Progress of Optical Phase Locked Loop in Space Laser Communication

Zhao Yi^{1,2,3} Tong Shoufeng^{1,2} Song Yansong^{1,2} Chang shuai^{1,2,3} Liu Yang^{1,2,3}

¹*Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

³*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Coherent detection technology can improve the sensitivity of homodyne receiver effectively. In the system of space laser communication, homodyne receivers make the phases of a local oscillator (LO) signal and a signal wave synchronize, and the optical phase locked loop (OPLL) is the most efficacious technology. Firstly, by including the theoretical model of the optical phase locked loop, the corresponding transfer function is derived. Meanwhile the main parameters affecting the performance of the optical phase-locked loop are discussed, such as the loop noise bandwidth, the natural frequency, the damping factor of the loop. The basic structure and characteristic of each OPLL type are described including: balance OPLL, Costas OPLL, synchbit OPLL, dither OPLL and sub-carrier OPLL, and their properties are compared. Finally, the development and application of OPLLs are summarized, and the prospect of the OPLL technology is prospected.

Key words optical communications; space laser communication; coherent detection; optical phase locked loop; sub-carrier optical phase locked loop

OCIS codes 060.1660; 060.2920; 060.5060; 060.4510

1 引言

随着信息量的迅速增长,通信行业正朝着高速率、大容量、远距离的趋势快速发展,空间激光通信系统

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-02-21; 网络出版日期: 2015-07-08

基金项目: 国家863计划(2012AA0042)

作者简介: 赵毅(1990—),女,硕士研究生,主要从事空间激光通信系统中零差相干探测方面的研究。

E-mail: cc_zhaoyi@163.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,主要从事航天遥感、卫星激光通信方面的研究。E-mail: tsf1998@163.com

以其绝对的优势备受各国通信研究者的青睐。目前空间激光通信体制主要分为直接探测(IM/DD)和相干探测。直接探测采用光强度调制,虽然设备简单、成本低,但系统的信噪比、灵敏度等性能均较差,不利于远距离信息传输。与IM/DD方式相比,相干探测的主要优点是:灵敏度高(比IM/DD方式高10 dB~25 dB);调制方式灵活(除了可以对光波进行幅度调制外,还可以进行频率调制或相位调制);信道选择性高(可用于信道间隔小到1~10 GHz的光频分复用技术,实现多信道复用)^[1-3]。

在空间相干激光通信中,根据本振光与信号光的频率是否一致,可分为零差探测和外差探测。理论上,零差探测的灵敏度与外差探测的灵敏度相比高出3 dB,因此如何实现零差探测,成为提高接收机灵敏度的核心问题^[4-5]。解决这一问题的关键是实现信号光与本振光的相位同步,这里引入了一个新的技术,即光学锁相技术。自20世纪90年代以来,随着光学锁相技术的不断发展,光学锁相环(OPLL)的类型不断丰富,零差接收机的灵敏度得到大幅度提高。如今,光学锁相环引起了国内外学者的广泛关注,已成为空间激光通信中零差探测研究的重点。

2 光学锁相环的理论模型

光学锁相环实质是模拟电锁相环的一种闭环相位控制系统,如图1所示。通常包括:等效鉴相器(PD)、等效压控振荡器(VCO)和环路滤波器(LF)^[6]。等效鉴相器(PD)用于比较信号光与本振光之间的相位差,它通常由光耦合器、90°混频器和平衡探测器等来实现;LF具有低通功能,能够滤除高频噪声,通过改变LF的参数可以调整锁相环路的参数;VCO利用相位差信号来控制本振激光器的输出,使本振光频率与信号光频率实现动态一致,即达到光学锁相。传统的光学锁相环中VCO是由可调谐激光器等效实现的。

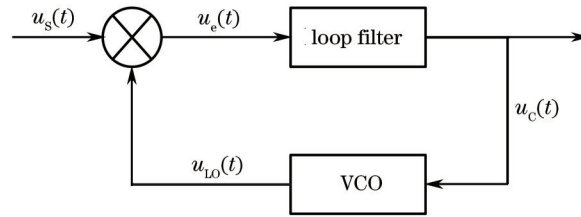


图1 锁相环的基本原理图

Fig.1 Basic PLL circuit

假设锁相环的本振光由 $u_{l0}(t)$ 表示,信号光由 $u_s(t)$ 表示。则系统的本振光与信号光在时域上可表达为

$$u_s(t) = u_1 \sin(\omega_s t + \varphi_s), \quad (1)$$

$$u_{l0}(t) = u_2 \cos(\omega_{l0} t + \varphi_{l0}), \quad (2)$$

假设乘法器是理想的,鉴相器(PD)的输出为

$$u_e(t) = K_{pd} u_s(t) u_{l0}(t) = \frac{K_{pd} u_1 u_2}{2} \left\{ \sin[(\omega_s + \omega_{l0})t + \varphi_s + \varphi_{l0}] + \sin[(\omega_s - \omega_{l0})t + \varphi_s - \varphi_{l0}] \right\}, \quad (3)$$

式中 K_{pd} 为相位探测器的系数,取值恒定。假定 $\omega_s = \omega_{l0}$,且相位差很小时,(3)式可近似为

$$u_e(t) = \frac{K_{pd} u_1 u_2}{2} \sin(\varphi_s - \varphi_{l0}) \approx \frac{K_{pd} u_1 u_2}{2} (\varphi_s - \varphi_{l0}). \quad (4)$$

此时,由于环路带宽的限制,(3)式中频率相加项可以忽略。LF能够消除相位探测器输出信号的噪声和 高频成分,同时决定着整个闭环反馈系统的动态性能。环路滤波器输出信号 $u_c(t)$ 的表达式为

$$u_c(t) = f(t) \otimes u_e(t), \quad (5)$$

式中 $f(t)$ 为脉冲响应,“ \otimes ”表示卷积计算。VCO的传递函数为

$$\varphi_{l0} = G_{vco} \cdot \int_0^t u_c(\tau) d\tau, \quad (6)$$

式中 G_{vco} 为增益因子,决定着VCO频率波动的灵敏度。

(4)~(6)式定义了一个锁相环的反馈环路,对其进行拉氏变换:

$$U_e(s) = \frac{K_{pd} u_1 u_2}{2} [\Phi_s(s) - \Phi_{l0}(s)], \quad (7)$$

$$U_c(s) = F(s) \cdot U_e(s), \quad (8)$$

$$\Phi_{LO}(s) = G_{VCO} \cdot \frac{U_c(s)}{s}. \quad (9)$$

将(7)~(9)式中的 Φ_s/Φ_{LO} , 得到锁相环的闭环传递函数:

$$H(s) = \frac{\Phi_{LO}(s)}{\Phi_s(s)} = \frac{s^{-1}G_{loop}F(s)}{1 + s^{-1}G_{loop}F(s)}, \quad (10)$$

式中 $G_{loop} = G_{VCO}K_{PD}u_1u_2/2$ 表示锁相环路的总体增益。则误差传递函数表示为

$$1 - H(s) = \frac{\Phi_c(s)}{\Phi_s(s)} = \frac{\Phi_s(s) - \Phi_{LO}(s)}{\Phi_s(s)} = \frac{1}{1 + s^{-1}G_{loop}F(s)}. \quad (11)$$

要进一步分析 OPLL 的整体性能, 还需要确定放大器的放大倍率, 以及环路滤波器的传输特性。假设放大器的放大倍率较大, 传递函数如下:

$$F(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{sR_2C_1 + 1}{sR_1C_1} = \frac{s\tau_2 + 1}{s\tau_1}, \quad (12)$$

两个时间常数分别为

$$\tau_1 = R_1C_1, \quad (13)$$

$$\tau_2 = R_2C_1. \quad (14)$$

LF 影响 OPLL 的两个重要参数是自然频率 w_n 和阻尼比 ξ , 其满足

$$2\pi f_n = w_n = \sqrt{\frac{G_{loop}}{\tau_1}}, \quad (15)$$

$$\xi = \frac{\tau_2}{2} \sqrt{\frac{G_{loop}}{\tau_1}} = \frac{w_n\tau_2}{2}, \quad (16)$$

将其代入(11)式中可获得新的闭环传递函数, 如下:

$$H(s) = \frac{G_{loop}(s\tau_2 + 1)/\tau_1}{s^2 + sG_{loop}\tau_2/\tau_1 + G_{loop}/\tau_1} = \frac{2\xi w_n s + w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}, \quad (17)$$

锁相环中另一个重要的参数就是环路的噪声带宽, 即

$$B_n = \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df = \pi f_n \left(\xi + \frac{1}{4\xi} \right). \quad (18)$$

3 光学锁相环的种类与性能分析

20 世纪末, 随着空间激光通信的快速发展, 光学锁相技术也得到了发展和改进, 各国相继开展了利用各类光学锁相环的接收机演示实验。下面介绍了不同的 OPLL, 并对其性能进行分析。

3.1 平衡锁相环

平衡环是最简单的光学锁相环, 如图 2 所示。平衡环主要包括 180° 混频器、平衡探测器、环路滤波器和本振激光器。其中实现鉴相功能的是 180° 混频器和平衡探测器。信号光与本振光通过 180° 混频器, 使平衡探测器的两个对称光电二极管接收到相同功率的光信号, 再经过跨阻放大器后直流(DC)分量被抵消, 从环

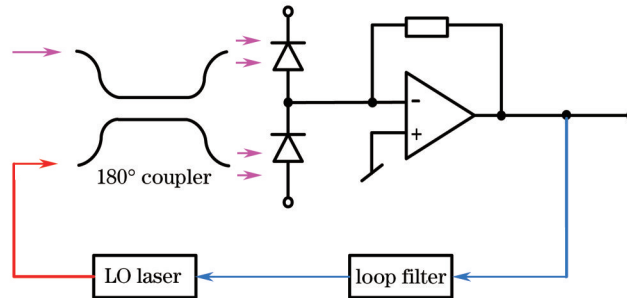


图 2 平衡锁相环

Fig.2 Schematic overview of the balanced loop

路滤波器得到的相位差进入本振(LO)激光器调节接口,实现相位的同步跟踪^[7-8]。在锁相过程中,平衡环需要传输一个残余载波,以确保当信号光与本振光相位为零时,仍能进行相位锁定,因此在平衡环中需要进行二次解调。平衡锁相环虽然结构简单易于实现,可以传输模拟和数字信号,但会受数据通道和锁相通道之间的串扰影响,且对线宽要求严格,因此逐渐被新的光学锁相环所取代。

3.2 Costas锁相环

Costas锁相环是零差系统中最受青睐的光学锁相环之一,基于二进制相移键控(BPSK)的Costas锁相环被认为是目前灵敏度最高的零差系统^[9]。其主要由 90° 混频器、双支路平衡探测器、环路滤波器和本振激光器组成。如图3所示。信号光与本振光在混频器中实现相干叠加相移后输出四路带有相位信息的光束,分别为 0° 、 180° 、 90° 、 270° 。在混频器中能量分配比 α ,可以决定I支路(通信支路)与Q支路(相位支路)输出的功率分布,乘法器的使用能够将调制信息消除,同时将相位误差放大2倍,增加了执行精度。当相位差恒定时,相位噪声为零,乘法器的输出为零,I支路上的信号即为调制信号。Costas锁相环不仅可以有效地提高接收机的灵敏度,同时可以避免直流分量的影响。在选择合适截止频率的低通滤波器情况下,可降低噪声带宽,保证良好的频率跟踪性能。

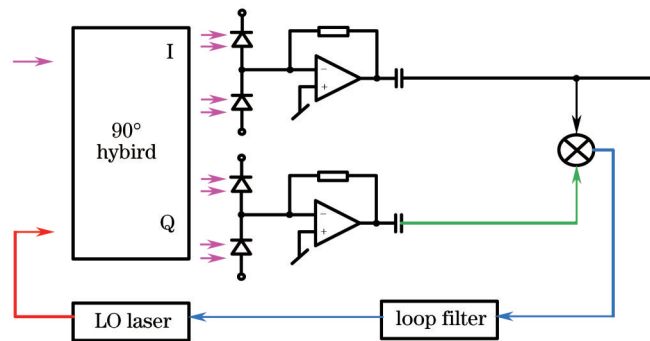


图3 Costas锁相环

Fig.3 Schematic overview of the Costas loop

在Costas锁相环的搭建中,因为混频效率、相移精度、光功率损耗等因素的影响,以及温度、震动等情况带来的偏差,使得 90° 混频器在零差相干通信中的实现更加困难^[10-12]。与此同时,本振源由可调谐激光器直接实现,在具体实验中,利用温度、电压、电流来控制的可调谐激光器,由于其频率的改变具有一定的延时性,很难实现快速、大范围的频率调谐,因此具有一定的实现难度。

3.3 同步位锁相环

同步位锁相环是利用一个环路开关的闭合,来实现Costas锁相环I支路与Q支路的分时传输,同时用 180° 混频器代替 90° 混频器,使结构简化,易于实现。如图4所示,在大多数时间里,环路开关是打开的,接收到的信号只在I支路中作用。在1 bit的间隙时,环路开关闭合,实现Q支路的同步锁相,因此称为同步位锁相环^[13]。在同步时,接收机需要一个传输数据的优先信息,通常通过在数据流中加入零位信息,或改进编码算法来实现。由于功率损耗是通过增加带宽的方式决定的,因此可以通过改变同步位发生的频率来控制。也可以直接利用闭环控制发射机的相位调制,这样可以大大降低系统的复杂度。但同步位锁相环对线宽的

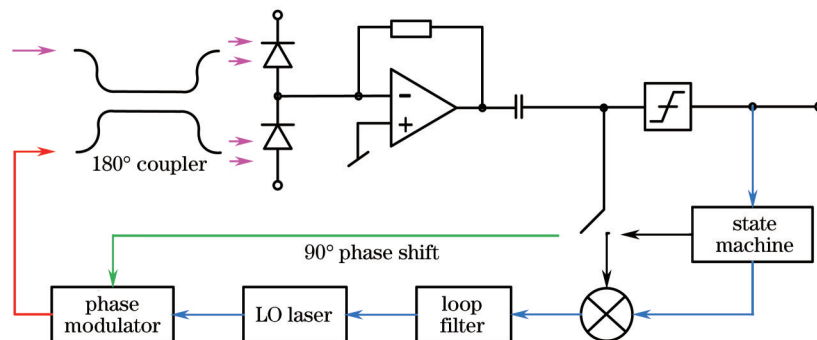


图4 同步位锁相环

Fig.4 Schematic overview of the synchbit loop

要求高于 Costas 锁相环。

3.4 振荡锁相环

振荡锁相环利用传统的平衡锁相环结构,但不再需要传输残余载波,而是在本振光中加入一个小的相位扰动,称为振荡信号。如图5所示, a_d 和 ω_d 分别为振荡信号的幅值和角频率, A_d 为同步解调的幅值。经由射频(RF)放大器的中频信号,通过功率探测器形成一个自动增益控制(AGC)环路。当相位差不为零时,输出端可以探测到含有这个振荡信号的频率部分,其幅值与相位差成正比,相位取决于原始扰动的正负。因此利用同步解调,可以在振荡信号中提取出相位差信息^[14-15]。由于振荡信号减少了信号的平均幅值,因此造成了一定的功率损耗,但这种损耗可以通过改变振荡信号的振幅来控制。振荡锁相环对激光线宽的要求也高于 Costas 锁相环。

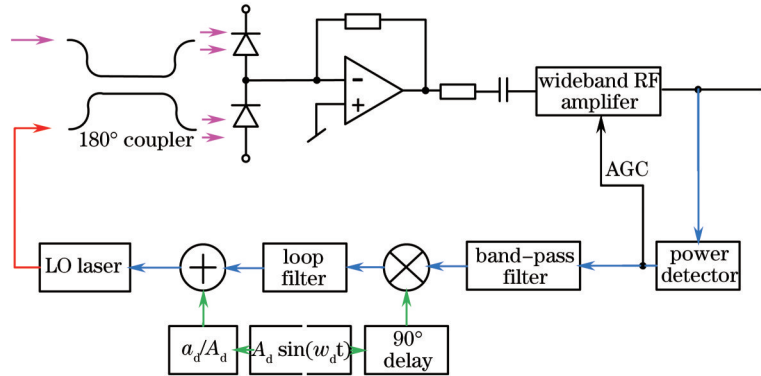


图5 振荡锁相环

Fig.5 Schematic overview of the dither loop

3.5 副载波锁相环

2004年,意大利的 Camatel 等^[16]最早提出了一种基于外调制方式控制本振光频率调谐的新型光学锁相环,被称为副载波光锁相环(SC-OPLL),结构如图6所示。SC-OPLL与传统的光学锁相环不同,它不是直接利用可调谐激光器进行频率调谐,而是通过一个VCO和马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器对本振激光器进行强度调制,称为OVCO(optical VCO)。由于SC-OPLL的频率调谐速率可达到内置电子压控振荡器的变化速率,因此可实现快速大范围的频率调谐。与各种传统光学锁相环相比,SC-OPLL有效地改善了可调谐激光器在实际锁相过程中调谐速率低、范围小、对激光器的线宽要求高等问题,同时避免了因可调谐激光器频率的改变伴随着的伪振幅调制。

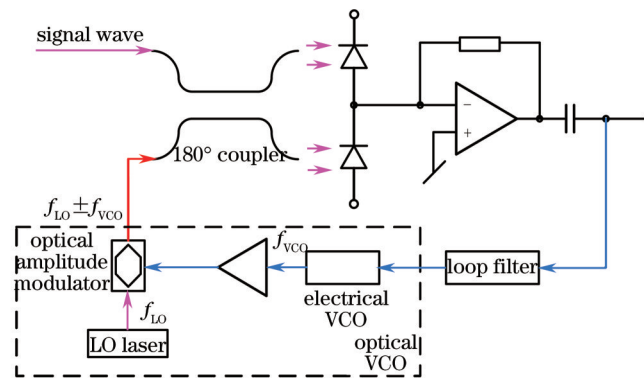


图6 副载波锁相环

Fig.6 Schematic overview of the SC-OPLL

2006年,这种新型的OVCO结构被用于决策驱动锁相环(决策驱动锁相环与 Costas 锁相环的主要区别是I支路上的信号需要经过判断电路处理后,再与Q支路相乘。为了达到两支路的时间同步,Q支路中存在1 bit的延时器),并进行了实验验证,Torrenco 等^[17-20]利用两个1548.553、1548.694 nm的激光器,使初始频率相差6 GHz,经实验测得利用OVCO结构的决策驱动锁相环相比于SC-OPLL,性能可提高3 dB左右。同年,SC-OPLL被用于波分复用(WDM)零差相干探测系统,在2.5 GHz的传输信道中,功率损耗为2.5 dB。虽然

这种新型的 OVCO 结构可以改善传统可调谐激光器的性能,但其双边带抑制载波调制的特性降低了本振光功率的利用率。为了改善这一问题,Camatel 等于 2008 年提出了一种基于四相移相键控(QPSK)调制的单边副载波锁相环(SS-SC-OPLL),这种锁相环不仅具有 SC-OPLL 的优势,而且整体性能提高大约 3 dB,但同时系统也更为复杂。2013 年,日本进行了基于 QPSK 的 SC-OPLL 演示实验,在传输距离为 150 km 时,功率损耗低于 1 dB^[21-22]。

3.6 OPLL 的性能分析与比较

在空间相干激光通信领域,对光学锁相环的研究越来越受到各国的重视,上面提到的 5 种光学锁相环因其不同的结构和特性,被应用于各类相干接收系统。表 1 主要从以下几个方面对其总体性能进行比较。

表 1 5 种锁相环性能比较

Table 1 Performance comparison of different OPLLs

| OPLL type | Balance | Costas | Syncbit | Dither | SC-OPLL |
|---|---------|--------|---------|--------|---------|
| | OPLL | OPLL | OPLL | OPLL | |
| Don't need to transfer the residual carrier | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Don't need 90° hybrid | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Don't need DC coupled front-end | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Transparent link | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| Line width requirement is not high | | ✓ | | | ✓ |
| Phase lock power can be tunable | | | | ✓ | |
| It has OVCO structure | | | | | ✓ |

1) 残余载波传输:假设数据信号的功率在通带中保持恒定,传输残余载波会增加平均信号功率,因此应尽量避免。

2) 混频器/光耦合器:180°混频器是市面上最常见的光学器件,它的输出端的两个支路功率相同,且具有损耗低、易于实现的优势。相比而言,90°混频器的输出端有明显差异,例如 Costas 环中,90%在信号通道(I 支路)中,10%在锁相通道(Q 支路)中,但是 90°混频器相对于空间光的实现十分困难,应尽量避免。

3) 前端耦合:在环路信号中,直流耦合前置电路的复杂性要高于交流耦合,因此应尽量避免。

4) 透明链路特性:为了配合不同发射信号对接收机的需求,实现最高效率的链路性能,锁相环应选择既可以传输数字信号,也可以传输模拟信号的全透明链路。

5) 锁相环中的功率损耗:为了减小接收机的功率损耗,用于锁相的功率越小越有利,因此在接收机中控制锁相支路的功率大小,是减小功率损耗的一种有效方法。

6) 本振光的频率调谐:传统光学锁相环是通过调节温度、电压、电流的方式控制可调谐激光器频率的改变,而具有 OVCO 结构的 SC-OPLL 是利用 VCO 得到相位差的电信号(f_{vco}),控制 Mach-Zehnder 调制器,使经过调制器输出的本振光的频率发生改变(如 $f_{lo} \pm f_{vco}$),在此过程中可调谐激光器的频率不变(如 f_{lo})。因此可以实现快速、大范围的频率调谐。

4 光学锁相环在空间激光通信中的应用

从 20 世纪 90 年代开始,空间激光通信的研究得到了快速的发展,光学锁相技术日渐成熟,国外已开展了基于光学锁相环的零差相干探测系统的研究,并进行了多组仿真与实验(表 2 列出了部分具有代表性的实验数据)。

表 2 各种类型光学锁相环的零差相干探测实验

Table 2 Experiments of homodyne coherent detection based on OPLLs

| Time | Country | OPLL type | Modulation | Wavelength / | Bit rate / | Photons / | Power |
|------|-------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------------|--------------|
| | | | format | nm | (Mbit/s) | bit ⁻¹ | penalty /dBm |
| 1990 | America | Balance OPLL | PSK | 1508 | 4000 | 72 | -44.2 |
| 1992 | Australia | Costa OPLL | PSK | 1064 | 140 | 28 | -66.1 |
| 1992 | Germany | Syncbit OPLL | PSK | 1064 | 565 | 20 | — |
| 2005 | Switzerland | Dither OPLL | BPSK | 1064 | 400 | 36 | -55.7 |
| 2008 | America | Costa OPLL | BPSK | 1064 | 5600 | — | — |
| 2008 | Italy | SC-OPLL | BPSK | 1550 | 2500 | — | -12 |
| 2013 | Japan | SC-OPLL | QPSK | 1538.8 | 120000 | — | — |

随着零差相干探测技术研究的不断深入,欧洲、日本、美国等国家先后开展了基于低地球轨道(LEO)-LEO、LEO-地面、地球同步轨道(GEO)-LEO链路的空间激光通信计划,并取得了不小的成果。

4.1 LEO-LEO星间激光通信实验

德国的 TerraSAR-X 计划是搭载在 TerraSAR-X 卫星与搭载在美国国防部的 NFIRE(Near Field Infrared Experiment)卫星上的两台相干激光通信光端机(LCT)间的星间链路计划,LCT光端机及 LEO-LEO 激光通信实验装置图如图 7 所示。2008 年 2 月,两颗卫星使用激光载荷成功进行了空间宽带数据传输,在相距 5000 km 的两颗卫星间成功开展了 5.6 Gb/s 的超高速双向通信,误码率优于 $10^{-9[23-25]}$ 。该载荷采用了 BPSK 调制方式下的零差相干解调,光学锁相环类型为 Costas 锁相环,通信波长为 1064 nm。

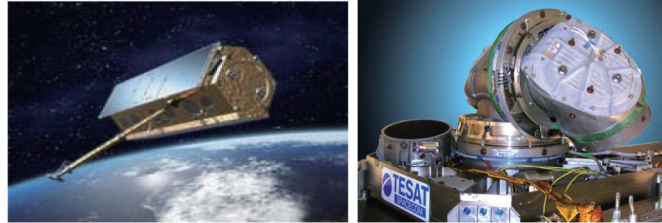


图 7 LCT 光端机及 LEO-LEO 激光通信实验

Fig.7 LCT and LEO-LEO laser communication link

4.2 LEO-地面激光通信实验

日本于 2000 年研制了用于国际空间站(ISS)对地的双向超高速光通信端机 LCDE(Laser Communication Demonstration Equipment),其上行码率为 1.2 Gb/s,下行码率为 2.5 Gb/s,使用 1550 nm 波段作为通信光,功耗小于 115 W,质量小于 90 kg。

2011 年,开展了美国 NFIRE 卫星与地面间的星地激光通信实验^[26-28],该实验采用零差 BPSK 调制方式,如图 8 所示。图 8 为星地相干激光通信下行链路的误码测试数据。图中 ERRCNT DATACHAN LOC OGS 为 error count data channel link of communication optical ground station 的缩写。实验结果表明,相对于星际激光通信,大气信道对于激光通信链路存在较大影响,星地链路的通信效果呈现双向不对称性,大气信道对下行通信链路影响较小,但对上行链路影响较为严重,基本不优于 10^{-5} 量级。

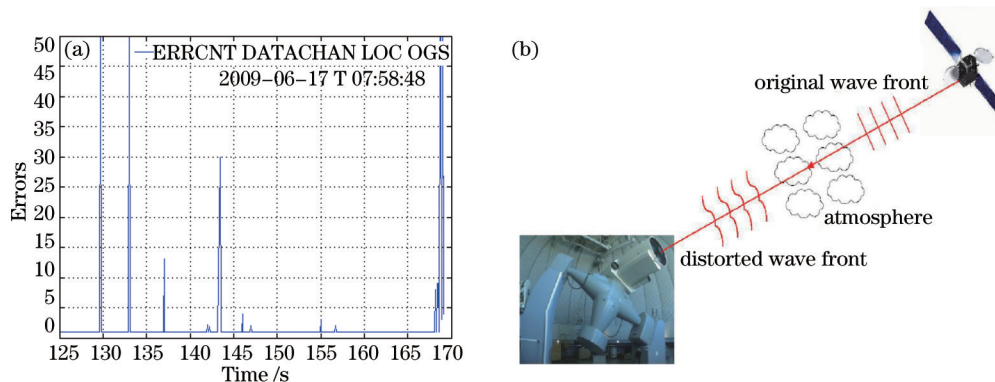


图 8 星地相干激光通信下行的误码测试数据与通信链路

Fig.8 Bit errors of the NFIRE-to-ground link and the communication link

4.3 GEO-LEO 星际激光通信实验

2001 年欧洲空间局(ESA)成功开展了第一个 GEO-LEO 星间激光通信链路,它是基于 IM/DD 的接收系统,传输速率为 50 Mb/s。从此一系列的 GEO-LEO 实验相继开展。德国航天中心(DLR)在一颗中继星 Alphasat 上,率先搭载数据中继技术演示载荷,该有效载荷包括星际激光通信光端机。如图 9 所示,其主要性能指标如下:通信距离为 45000 km;激光发射功率为 5 W;接收发射天线口径为 135 mm;误码率小于 10^{-8} ;发射/接收通信速率为 2.8 Gb/s;接收功率为 -48 dBm。2013 年 7 月 25 日,搭载 GEO 激光通信光端机的 Alfasat 卫星成功发射。与此同时,美国国家航空航天局指出目前正在研发的激光通信中继,预计将于 2016 年发射,通信速率为 1.25 Gb/s^[29-30]。

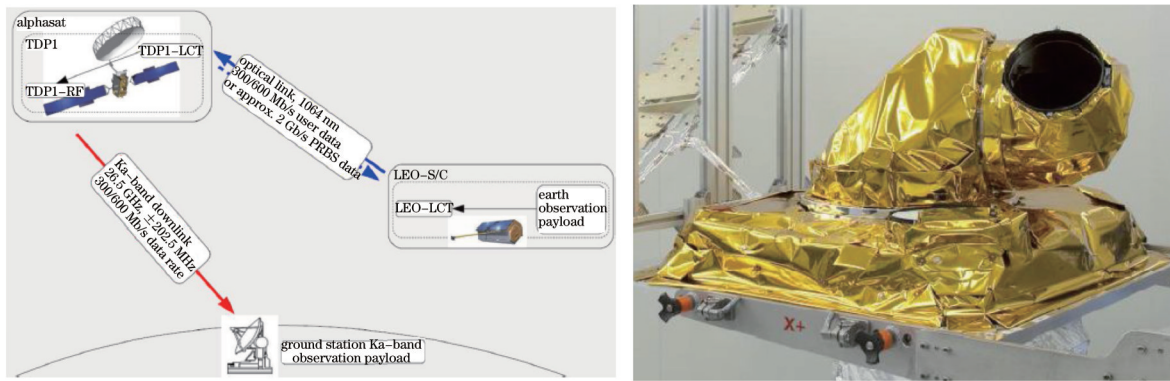


图9 GEO-LEO相干激光通信工作示意及GEO有效载荷

Fig.9 Schematic of GEO-LEO coherent laser communication and GEO terminal

5 结论

在具有高速率、高灵敏度、远距离传输特性的空间激光通信中,基于BPSK的零差相干探测系统是目前灵敏度最高的接收系统。近30年来,随着光学锁相技术的发展,光学锁相环的类型不断丰富。国外已成功进行了基于各类光学锁相环的演示实验,并对其性能进行了验证。其中新型的SC-OPLL中OVCO的使用,有效提高了本振光的调谐速率。在今后的研究工作中会将这种结构应用于各类光学锁相环。随着科技日新月异的发展,光学锁相技术的不断完善,接收系统的整体性能将会不断提高。

参考文献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong, *et al.*. The Technologies and System of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 134-143.
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 134-143.
- Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505009.
赵馨, 刘云青, 佟首峰. 动态激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.*. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵鑫, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- L G Kazovsky, D A Atlas. A 1320-nm experimental optical phase-locked loop: Performance investigation and PSK homodyne experiments at 140 Mb/s and 2 Gb/s[J]. J Lightwave Technol, 1990, 8(9): 1414-1425.
- R Lange, B Smutny. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: Heritage, status and outlook[C]. SPIE, 2005, 5712: 1-12.
- Daniel Abramovitch. Phase-locked loops: A control centric tutorial[C]. American Control Conference, Palo Alto: IEEE, 2002: 1-15.
- L G Kazovsky. Balanced phase-locked loops for optical homodyne receivers: Performance analysis, design considerations, and laser linewidth requirements[J]. J Lightwave Technol, 1986, 4(2): 182-195.
- C Rapp. Modulated residual carrier method with envelope processing: A novel phase synchronisation method for optical homodyne transmission[J]. Journal of the Communications Research Laboratory, 2000, 46(3): 321-323.
- T Q Hodgkinson. Costas loop analysis for coherent optical receivers[J]. Electron Lett, 1986, 22(7): 394-396.
- W R Reed. Optical 90° hybrid for costas-type receivers[J]. Electron Lett, 1990, 26(18): 1431-1432.
- Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Establishment of space light mixer mathematical model based on the space coherent laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706024.
郑阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706024.
- Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on space coherent laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906008.
郑阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906008.

- 13 W Glatt, M A Schreiblehner, C Haider. Optical PSK homodyne system using a switched residual carrier for phase synchronisation[J]. *Electron Lett*, 1996, 32(15): 1386–1387.
- 14 K Kudielka, W Klaus. Optical homodyne PSK receiver: Phase synchronization by maximizing baseband signal power[C]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting, San Francisco: IEEE*, 1999: 295–296.
- 15 F Herzog, K Kudielka, D Erni, *et al.*. Optical phase locked loop for transparent inter-satellite communications[J]. *Opt Express*, 2005, 13(10): 3816–3822.
- 16 S Camatel, V Ferrero, R Gaudino, *et al.*. Optical phase-locked loop for coherent detection optical receiver[J]. *Electron Lett*, 2004, 40(6): 384–385.
- 17 Enric Torrenço, Valter Ferrero, Stefano Camatel. A 20-Gb/s quadrature phase-shift-keying real-time coherent system based on a subcarrier optical phase-locked loop[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(18): 1296–1298.
- 18 S Camatel, V Ferrero. 2.5-Gb/s BPSK ultradense WDM homodyne coherent detection using a subcarrier-based optical phase-locked loop[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(18): 1919–1921.
- 19 S Camatel, V Ferrero. Phase noise power spectral density measurement of narrow linewidth CW lasers using an optical phase-locked loop[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(23): 2529–2531.
- 20 S Camatel, V Ferrero, P Poggiolini. 2-PSK homodyne receiver based on a decision driven architecture and a sub-carrier optical PLL[C]. *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim: OSA*, 2006: OTu13.
- 21 S Camatel, V Ferrero. Optical phase locking techniques: An overview and a novel method based on single side sub-carrier modulation[J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 818–828.
- 22 Yixin Wang, Keisuke Kasai, Tatsunori Omiya, *et al.*. 120 Gbit/s, polarization-multiplexed 10 Gsymbol/s, 64 QAM coherent transmission over 150 km using an optical voltage controlled oscillator [J]. *Opt Express*, 2013, 21(23): 28290–28296.
- 23 Ya'nan Zhi, Jianfeng Sun, Enwen Dai, *et al.*. High data-rate differential phase shift keying receiver for satellite-to-ground optical communication link[C]. *SPIE*, 2012, 8517: 85170F.
- 24 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.
- 25 B Smutny, H Kaempfer, G Muehlnikel, *et al.*. 5.6 Gbps optical inter-satellite communication link[C]. *SPIE*, 2009, 7199: 719906.
- 26 Mark Gregory, Frank Heine, Hartmut Kämpfer, *et al.*. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[C]. *SPIE*, 2011, 7923: 792303.
- 27 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, *et al.*. Technological research of differential phase shift keying receiver in the satellite-to-ground laser communication[C]. *SPIE*, 2012, 8517: 851714.
- 28 Yoshisada Takayama, Morio Toyoshima, Yoshisada Koyama. Current development status of small optical transponder (SOTA) for satellite-ground laser communications[C]. *SPIE*, 2012, 8246: 824607.
- 29 Xiaoli Sun, David R Skillmana, E D Hoffman, *et al.*. Simultaneous laser ranging and communication from an earth-based satellite laser ranging station to the lunar reconnaissance orbiter in lunar orbit[C]. *SPIE*, 2013, 8610: 861003.
- 30 M B Taylor, P A MacKoula, R T Schulein. Nonlinearity mitigation of a 40-watt 1.55-micron uplink transmitter for lunar laser communications[C]. *SPIE*, 2013, 8610: 86100F.

栏目编辑: 王晓球