

文章编号: 0253-2239(2010)02-0347-05

# 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测

许楠<sup>1</sup> 刘立人<sup>1</sup> 万玲玉<sup>2</sup> 孙建锋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室 上海 201800)

<sup>2</sup> 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004

**摘要** 空间相干激光通信终端中的跟瞄(PAT)系统性能直接影响通信质量。在通用的相干接收机系统中加入 CCD 和图像处理软件, 在对传输信号进行相干探测的同时可得到目标位置误差信息, 实现发射光束的实时调整。给出了干涉场强的理论表达式以及图像参数与目标位置的关系式, 并讨论了实际应用中波长抖动对位置误差探测精度的影响。通过计算机仿真, 验证了目标位置相干探测原理以及波长扰动分析的正确性。

**关键词** 空间激光通信; 相干探测; 跟瞄系统; 位置误差

中图分类号 TN 929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0347

## Coherent Detection of Position Errors in Space Laser Coherent Communications

Xu Nan<sup>1</sup> Liu Liren<sup>1</sup> Wan Lingyu<sup>2</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract** Pointing, acquisition and tracking (PAT) system is the key component in inter-satellite laser coherent communications. A novel method to coherent detection of position errors information is proposed. Based on the system composing, this method adds CCD and computer as position error detector. The position errors as the control signal of PAT subsystem drive the receiver telescope to keep tracking to the target. Theoretical deviation of the relation equation is given, and the analysis of the effect of the wavelength stability on the precision is presented. Finally the simulation results validate the method.

**Key words** space laser communications; coherent detection; pointing, acquisition and tracking (PAT) system; position error

## 1 引言

和直接探测方式的接收机相比, 相干接收机大大提高了接收机灵敏度和波长选择性, 更适合超长距离下微弱信号探测的空间相干激光通信, 是实现空间激光通信终端高精度、高码率、轻量化及工业化标准的有效途径之一<sup>[1~6]</sup>。跟瞄(Pointing, acquisition and tracking, PAT)系统是空间相干激光通信终端的重要

组成部分之一, 其性能优劣直接影响到通信质量。跟瞄系统利用对方终端的空间位置信息作为控制信号, 通过粗跟瞄和精跟瞄配合进行闭环控制, 来调整信标光以及发射光束的方向, 实现两颗卫星在高速相对运动中的稳定链接。欧洲航空局继直接探测方式的半导体激光通信计划(SILEX)计划成功后, 又与英国合作发展了采用相干探测方式的 OPTEL 终端系列。

收稿日期: 2009-07-10; 收到修改稿日期: 2009-08-12

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z298)资助课题。

作者简介: 许楠(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事空间相干光通信以及激光相干接收等方面的研究。

E-mail: xunan@mail.siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间激光通信、光折变光学和晶体光学等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shnc.ac.cn

该系列终端采用了光纤偏转器作为目标终端的跟踪传感器,在光纤头沿锥形高速扫描过程中,通过耦合到光纤中的光能大小来获得目标位置误差信息<sup>[7,8]</sup>。德国开展的空间固体激光通信试验(Solid State Laser Communications in Space, SOLACOS)完成的相干通信试验模型同样采用了光纤偏转器作为高精度的光束角度探测器<sup>[9,10]</sup>。

本文提出了一种适用于空间相干光通信中的目标位置误差探测的方法:在相干接收机中加入 CCD 和计算机处理软件,作为目标位置的相干探测器。在对传输信号进行相干探测的同时,由 CCD 得到包含目标位置误差信息在内的干涉图像,通过对干涉图像的处理和分析获得目标位置误差信息,该信息作为跟瞄系统的控制信号对发射光束进行控制。在对常规相干接收机系统较小的改动下,增加目标位置误差探测的功能,有助于发射光束的实时调整,并可扩展到激光测距中。建立了干涉图像强度分布的理论推导,给出了干涉图中心位置和 target 位置的关系式,并分析了波长抖动对位置误差探测的影响,最后根据实际应用参数建立了计算机仿真模型,仿真结果验证了该探测方法的正确性。

## 2 位置误差相干探测的原理

相干激光终端通常采用连续波和相干探测体制,系统包括发射机和接收机两大部分(如图 1 所示)。发射机由发射激光器、光调制器和发射光学天线组成;接收机由接收光学天线、本振激光器、光学桥接器、光电探测器以及锁相环路组成。光学桥接器在空间精确合成信号波前和本振波前,以产生两者的差频。混频光束包含信号光和本振光相差信息,经平衡探测后提取出传输信号。同时,相差信息经环路滤波器转换为频差信息,作为本振激光器的调频控制信号,对本振激光器的频率进行微调,和信

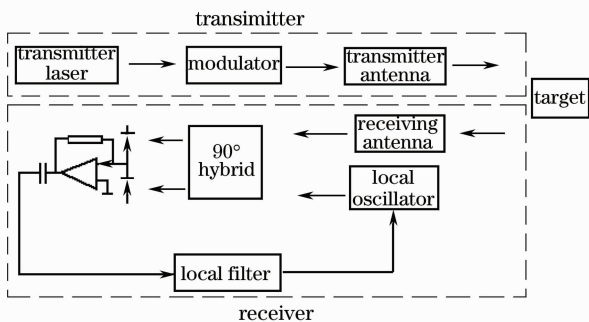


图 1 相干通信系统

Fig. 1 Coherent communication system

号光保持稳定的频率关系。

发射光束为平面波,经目标反射后,由接收光学天线接收和变换,得到球面波形式的信号光。CCD 表面即  $xoy$  面的坐标定义如图 2 所示。

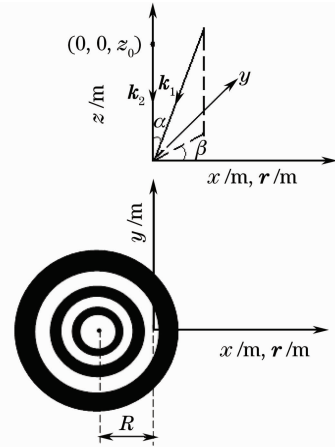


图 2 位置误差相干探测的坐标系

Fig. 2 Coordinate system of position error coherent detection

干涉面上信号波波前为

$$E_1(x, y, z) =$$

$$A \exp[jk_1(x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \sin \beta) + \varphi_{01}], \quad (1)$$

式中  $A$  为振幅;  $k_1$  为信号波波矢值;  $\alpha$  为波矢  $k_1$  和  $z$  轴的交角; 方位角  $\beta$  为波矢  $k_1$  在  $xoy$  平面投影和  $x$  轴的夹角;  $\varphi_{01}$  为初始相位。

本振波的点源坐标为  $(0, 0, z_0)$ , 干涉面上的波前为

$$E_2(x, y, z) = \frac{B}{\rho} \exp[-j(k_2 \rho + \varphi_{02})], \quad (2)$$

式中  $B$  为振幅;  $k_2$  为本振波波矢值;  $\varphi_{02}$  是初始相位, 空间半径  $\rho = (x^2 + y^2 + z_0^2)^{1/2} = (r^2 + z_0^2)^{1/2}$ , 平面半径  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 。

在非涅耳近似下, (2) 式可写为

$$E_2(x, y, z) = B \exp\left[-j\left(k_2 \frac{r^2}{2z_0} + \varphi_{02}\right)\right], \quad (3)$$

则得到干涉面上的强度分布

$$I(r) = A^2 + B^2 + 2AB \cos \left[ k_1 r (\sin \alpha \cos^2 \beta + \sin \alpha \sin^2 \beta) - k_2 \frac{r^2}{2z_0} + \Delta \varphi_0 \right], \quad (4)$$

式中 初始相差  $\Delta \varphi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ 。

旋转坐标系使俯仰角  $\beta = 0$ , (4) 式写为

$$I(r) = A^2 + B^2 + 2AB \cos \left( k_1 r \sin \alpha - k_2 \frac{r^2}{2z_0} + \Delta \varphi_0 \right). \quad (5)$$

余弦项取最大值的坐标点即为所有极大点位置, 得到干涉图上的亮条纹分布为

$$\left(r - \frac{k_1}{k_2} z_0 \sin \alpha\right)^2 = \left(2n\pi + \Delta\varphi_0 + \frac{k_1^2}{2k_2} z_0 \sin^2 \alpha\right) \frac{2z_0}{k_2}. \quad (6)$$

由(6)式可知,干涉图为明暗相间的同心环状条纹,其中心点坐标为

$$R = \frac{k_1}{k_2} z_0 \sin \alpha, \quad (7)$$

若相干通信为零差探测,则  $k_1 = k_2 = k$ , 得到更简单的中心点偏心量表达式为

$$R = z_0 \sin \alpha. \quad (8)$$

对于相干通信终端,波矢  $k_1, k_2$  和本振光参数  $z_0$  已知,环状干涉条纹的中心点偏心量  $R$  仅为回波俯仰角  $\alpha$  的函数。只要得到干涉图像上环状干涉条纹的中心点偏移量  $R$  就可由(7)式推算出回波的俯

仰角  $\alpha$ 。在空间激光通信超长的通信距离下,俯仰角变化很小,可认为干涉条纹圆环中心位置和目標俯仰角为简单的线性关系,更利于直接对比目标位置变化。

在相干接收机中加入 CCD 摄像机和计算机,作为目标位置的相干探测器。光学桥接器的任意输出均可在 CCD 摄像机上得到接收光和本振光的干涉图像。经过计算机对干涉图像的处理和分析,得到目标位置信号。望远镜系统通常安装有编码器,可得到自身的偏转角度。望远镜自身偏转角度和目标位置信息的差值作为反馈信号,驱动望远镜的机电部分进行偏转,校正望远镜的偏转方向。发射望远镜同样可利用目标位置信号对其自身实时进行调整(图 3)。

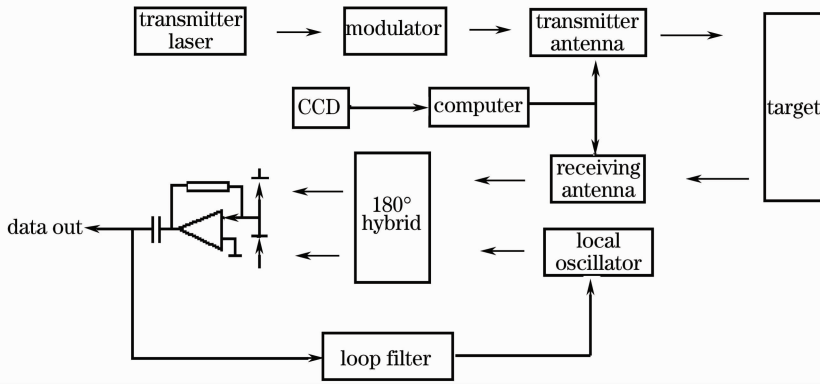


图 3 带有目标位置误差探测的相干通信系统

Fig. 3 Coherent communication system with detection of target position error

### 3 探测精度的误差分析

对于零差探测方式的相干通信系统,信号光和本振光的频率应保持一致。若信号光和本振光存在频差  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \neq 0$ , 则会引起干涉场强分布的变化,相应影响目标空间位置信号的探测精度。

设信号光和本振光之间频差为  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ , 则干涉面上平面波场强为

$$E_1(\omega_1; \alpha, \beta; x, y; t) = A \exp(j\omega_1 t) \times \exp\left\{-j\left[\frac{\omega_1}{c}(x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \sin \beta) + \varphi_{01}\right]\right\}. \quad (9)$$

干涉面上球面波场强为

$$E_2(\omega_2; x, y; t) = B \exp(j\omega_2 t) \exp\left[-j\left(\frac{\omega_2}{c} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2z_0} + \varphi_{02}\right)\right]. \quad (10)$$

因此,得到干涉图分布表达式

$$I(\omega_1, \omega_2; \alpha, \beta; r; t) = A^2 + B^2 + 2AB \cos\left[\frac{\omega_1}{c} \left(r \sin \alpha \cos^2 \beta + r \sin \alpha \sin^2 \beta - \frac{r^2}{2z_0}\right) + \Delta\omega \left(t - \frac{r^2}{2z_0}\right) + \Delta\varphi_0\right]. \quad (11)$$

对比(4)式和(11)式,可知干涉面上每一点场强都会增加一个由  $\Delta\omega$  引起的附加相位,这个附加相位包括两部分:1)固定附件相位,和  $\Delta\omega$  成正比;2)随时间变化相位,变化速率为  $\Delta\omega$  成正比。附加相位改变整个干涉条纹包括中心点在内的明暗变化。

同样旋转坐标系使  $\beta = 0$ , 并转换到极坐标系下,干涉图上的亮条纹分布为

$$\left[r - \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_2}\right) z_0 \sin \alpha\right]^2 = (2n\pi + \Delta\varphi_0) \frac{2z_0 c}{\omega_2} + z_0^2 \sin^2 \alpha \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_2}\right)^2 - 2z_0 c \frac{\Delta\omega}{\omega_2} t. \quad (12)$$

由(12)式可知,对于零差探测,若信号光和本振

光频率没有保持一致,存在频差  $\Delta\omega$ , CCD 上得到干涉条纹的中心点位置有一个和  $\Delta\omega/\omega_2$  成正比的漂移,会对目标位置信号的探测精度造成影响。而附加相位只改变明暗变化,对中心点位置不会增加误差。但从通信的角度来看,附加相位也会对数据探测造成影响,因此在零差探测的相干通信系统中,应保证信号光和本振光的频率同步。通常使用的相位同步方法是光学锁相环。

## 4 计算机仿真

为验证目标位置误差相干探测的理论,对回波

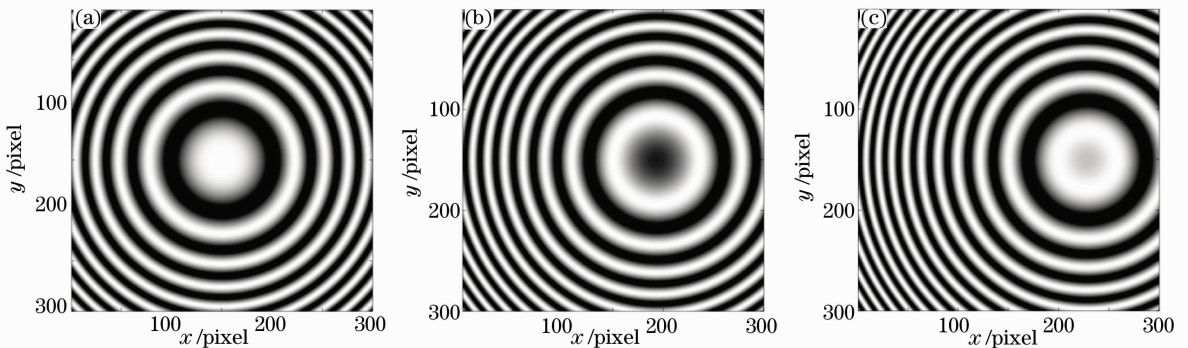


图 4 (a)  $\alpha=0$ , (b)  $\alpha=0.87 \mu\text{rad}$ , (c)  $\alpha=1.57 \mu\text{rad}$  时的模拟干涉图

Fig. 4 Simulated interferograms with (a)  $\alpha=0$ , (b)  $\alpha=0.87 \mu\text{rad}$ , (c)  $\alpha=1.57 \mu\text{rad}$

在零差相干通信系统中引入 10% 的波长抖动,中心点位置较无误差时增加一个漂移量,并随着俯仰角  $\alpha$  增大而增大。图 5 中为在有波长抖动和无波长抖动两种情况下中心点偏心量随俯仰角  $\alpha$  变化的函数曲线。

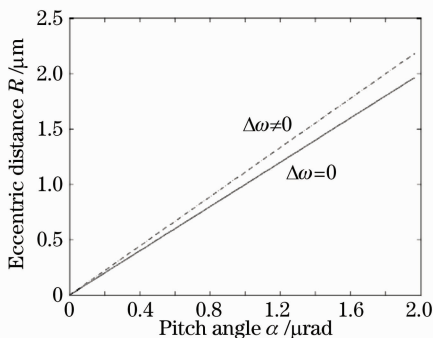


图 5 中心点偏心量

Fig. 5 Eccentric distance of the center point

## 5 结 论

提出了一种在相干探测传输信号同时,对目标的位置误差信号进行相干探测的新方法。在空间相干激光通信终端通用结构中,加入由 CCD 摄像机和

和本振波的干涉图像进行计算机仿真。考虑到空间相干激光通信实际情况,选取零差探测方式,通信波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ,回波功率为皮瓦量级,本振波功率为 10 毫瓦量级,CCD 摄像机的视场范围为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (以常见的  $10 \mu\text{m}$  像素尺寸为例,像素  $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ ),可以观测的俯仰角  $\alpha$  范围约为  $\pm 100 \mu\text{rad}$ 。图 4 分别为俯仰角  $\alpha$  取  $0, 0.87$  和  $1.57 \mu\text{rad}$  时的模拟干涉图。如理论所得结果,干涉图像为一系列明暗相间的同心圆环,并随着俯仰角  $\alpha$  的变化,所有圆环随之漂移,并伴随着圆环的吞吐,中心点明暗也随之变化。

计算机处理软件组成的位置误差探测器,即可实现在相干接收机中实现传输信号和目标位置信息的同时探测。在平面回波和球面本振波的假设下,建立了位置误差信号相干探测的数学过程,得到干涉图像参数和目标位置信息的关系式,并对波长扰动引起的探测误差进行了分析。计算机仿真的结果验证了该探测原理的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 J. R. Barry, E. A. Lee. Performance of coherent optical receivers [J]. *IEEE*, 1990, **78**(8): 1369~1394
- 2 R. Lange, B. Smutny. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation; heritage, status and outlook [C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 1~12
- 3 R. Lange, B. Smutny. Highly-coherent optical terminal design status and outlook [J]. *IEEE*, 2005, **1**: 55~57
- 4 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
- 5 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification technique on the ground [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155  
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155
- 6 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space [J].

*Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(8): 44~51

许楠, 刘立人, 刘德安等. 自由空间相干光通信技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(8): 44~51

7 T. Dreischer, A. Maerki, T. Weigel *et al.*. Operating in sub-arc seconds: high precision laser terminals for intersatellite communications [C]. *SPIE*, 2002, **4902**: 87~98

8 K. Kudielka, A. Märki, G. C. Baister *et al.*. Aquisition and

tracking strategies of OPTEL 25 GEO terminal [J]. *IEEE*, 2002, **2**: 395~396

9 J. Flemmig, K. Pribil. Solid state laser communication is space (SOLACOS) position, acquisition and tracking (PAT) subsystem implementation [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 164~172

10 U. A. Johann, H. Sontag, K. Pribil A novel optical fiber based conical scan tracking device [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 243~251

## 《中国激光》“新型光纤传感器件及网络技术”专题 征 稿 启 事

光纤传感是光传感领域的重大技术革命, 光纤传感以其独特的优越性, 已成为现代传感技术发展的主流方向。光纤传感是一门发展十分迅速的新兴技术科学, 所提出的新原理、新方法和新技术已取得了诸多辉煌的成就。同时, 伴随着网络技术的发展, 光纤传感对现代光传感技术的发展产生了不可估量的作用。《中国激光》计划于 2010 年 6 月推出“新型光纤传感器件及网络技术”专题栏目, 现特向国内外广大专家学者征集“新型光纤传感器件及网络技术”方面原创性的研究论文和综述, 旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤传感及网络技术: 如基于光纤及光纤光栅的化学、生物、环境、物理、机械等传感器件、传感系统及传感网络技术等;
- 新型光纤传感及技术: 如光纤干涉及偏振传感技术、光子晶体光纤传感技术、微光纤传感技术等;
- 分布式光纤传感技术: 如以拉曼散射、布里渊散射等为基础的光纤传感技术;
- 光纤智能结构和材料: 包括结构设计、诊断方法、制作工艺、典型应用等;
- 用于光纤传感的无源及有源器件: 如光源\探测器等;
- 其他

特邀组稿专家:

徐安士 教授 北京大学

张伟刚 教授 南开大学

截稿日期: 2010 年 3 月 20 日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“新型光纤传感器件及网络技术”投稿), 详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限, 中英文皆可, 其电子版请使用 MS-word 格式, 有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《中国激光》编辑部