

文章编号: 0258-7025(2007)01-0069-05

卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择

于思源, 韩琦琦, 马 晶, 谭立英, 明 建

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用 CCD 对自由空间传输的激光进行成像, 可得到入射光束的角度信息以实现发射光束的控制。卫星光通信中, 提高对入射光束角度偏差实时测量的精度, 可以有效地提高终端的光束跟踪性能, 进而有效地保持激光链路的稳定。通过分析角度偏差检测原理, 建立了卫星光通信中跟瞄装置测角性能分析模型。分析了测角精度与 CCD 成像光斑弥散圆尺寸之间的关系, 并通过模拟实验进行了验证。结果表明, 在卫星光通信系统设计中, 综合考虑测角精度要求、终端功耗限制等因素, 选择 CCD 成像光斑相对尺寸在 2 到 3 之间为最佳。

关键词 光通信; 卫星光通信; 光束控制; CCD 成像; 光斑弥散圆; 相对尺寸

中图分类号 TN 929.13 **文献标识码** A

Size Selection of Dispersive Spot Imaging on CCD in a Satellite Optical Communication Terminal

YU Si-yuan, HAN Qi-qi, MA Jing, TAN Li-ying, MING Jian

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The propagating laser in free space was imaged by charge coupled device (CCD), so the incidence beam angles information can be obtained for the transmitting laser beam control. In satellite optical communications, improving the real-time measure precision for the angle errors of the incoming beam, higher tracking performance of a terminal can be reached and the laser link can be maintained steadily. The principium of the beam angle errors measurement was analyzed, and a model was founded for the angle errors measurement capability evaluation of the tracking assembly in satellite optical communications. The relationship of angle errors measurement precision with the size of dispersive spot imaging on CCD was analyzed using the model, and then some experiments were implemented to validate the results. It showed that considering the requirement for angle measurement precision and condition of the terminal power limitation, the relative size of the spot imaging on CCD should be between 2 and 3 in the design of a satellite optical communication system.

Key words optical communication; satellite optical communication; optical beam control; CCD imaging; dispersive spot; relative size

1 引 言

角度偏差测量在卫星光通信系统中担负着十分重要的作用^[1]: 在捕获阶段, 当信标光扫描到对方卫星并进入对方测角系统的视域时, 对方终端将根据测角装置提供的信标光方向来调整瞄准方向; 在跟踪和通信阶段, 由于两颗链路卫星处在高速的相对运动状态, 需要通过测角装置和闭环控制系统, 实时检测和控制光束的瞄准方向, 以保证链路稳定。

在欧空局的 SILEX 实验方案中, 采用 CCD 作

为大视域捕获探测器, 四像限探测器(QD)作为高频跟瞄探测器^[2]。此后, 美国 JPL 实验室提出了 CCD 可变像元窗口输出的设计方案 (Regions-of-Interest), 解决了捕获跟瞄探测器大视阈和高帧频要求之间的矛盾, 实现了系统的简化^[3]。滕树云等分析了孔径光阑限制下高斯光束的传输问题, 为高斯光束在自由空间光通信中的应用提供了重要的理论依据^[4]。荣健等给出了跟瞄精度与终端光束最佳发散角设计的关系, 为光通信系统的优化设计提供

收稿日期: 2006-02-13; 收到修改稿日期: 2006-08-14

作者简介: 于思源(1974—), 男, 黑龙江人, 副教授, 主要从事空间光通信技术方面的研究。E-mail: yusiyuanhit@sina.com

了参考^[5]。

对于光通信终端 CCD 成像光斑位置的测量,大多采用灰度重心法以实现图像目标的亚像素定位。一般情况下,在 CCD 上成像光斑的尺寸越大,则测量的精度越高,系统的跟瞄性能也会提高。对于卫星工作平台,由于发射光源功率受限,较大的 CCD 成像光斑将造成信号接收信噪比(SNR)下降,同时也会增加处理器运算负担,影响信号探测的实时性。可见,在卫星光通信中,对于 CCD 上成像光斑的尺寸的选择存在优化设计问题。

本文主要研究卫星光通信终端中 CCD 上成像光斑尺寸的选择问题,通过分析模拟实验,综合考虑检测精度、一定发射功率下的信噪比以及处理器运算能力等因素,给出最佳的成像光斑尺寸。

2 检测原理

图 1 为典型的卫星光通信终端入射光角度检测部分光路图。在卫星光通信过程中,对面终端发射的光束照射到终端的二维转台上,通过二维转台的两个全反镜进入望远镜。望远镜作为终端的接收天线,除了可以增大入射到探测器表面的光能量外,还可以缩短终端光束角度偏差检测光路的长度。由望远镜出射的光束经过透镜组聚焦后,入射到安装在焦平面上的 CCD 探测器上。为了增加终端角度偏差检测的信噪比,通常还要在光路中加入窄带滤光片。

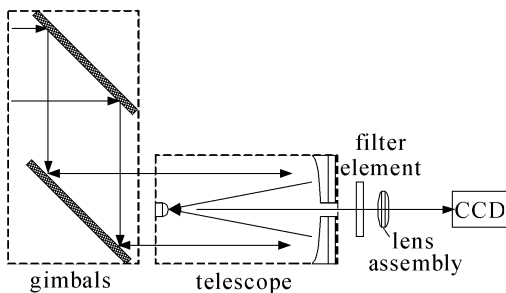


图 1 光束角度偏差检测装置

Fig. 1 Beam angle errors measurement assembly

在光通信跟瞄过程中,入射光束的方向需要通过 2 个角度量 (α 和 β) 来确定。如图 2 所示,以终端等效透镜中心为原点建立直角坐标系 $oxyz$,接收光路光轴沿入射光方向为 z 轴。对于入射到终端的光束,定义光束与基准面的夹角为俯仰角 α ,光束在基准面上的投影与 z 轴的夹角为方位角 β 。

设终端等效透镜焦距为 f ,在焦平面上建立平

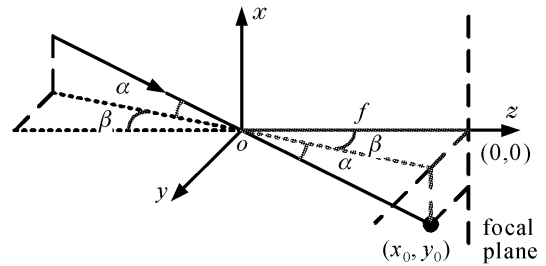


图 2 角度偏差测量

Fig. 2 Angle errors measurement

面直角坐标系,原点为 $(0,0)$,光束成像的中心坐标为 (x_0, y_0) 。信标光的方向 (α, β) 可表示为

$$\alpha = \frac{x_0}{\sqrt{f^2 + y_0^2}}, \quad \beta = \frac{y_0}{f}, \quad (1)$$

由于 f 的量级为 m,而 y_0 为 μm 量级,所以 α 可以近似表示为

$$\alpha = \frac{x_0}{\sqrt{f^2 + y_0^2}} \approx \frac{x_0}{f}, \quad (2)$$

上述为卫星光通信终端测量入射光束角度偏差的基本运算公式,其中光束成像点中心坐标 (x_0, y_0) 需要通过 CCD 探测后确定。可见,光斑位置的测量是终端测量角度偏差的关键。利用 CCD 对光斑进行实时采样,由灰度中心法可以得到光斑中心位置信息。设 CCD 光敏面上图像光强分布为 $I(i, j)$,其中 (i, j) 表示 CCD 像元在探测平面坐标系中的位置,光斑 S 的灰度重心 (x_0, y_0) 为

$$x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iW(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i,j)}, \quad y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jW(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i,j)}, \quad (3)$$

其中 $W(i, j)$ 为权值,(3) 式中取 $W(i, j) = I(i, j)$ 。在激光通信正常工作情况下,光斑灰度值大于背景灰度值,权重 $W(i, j)$ 为

$$W(i, j) = \begin{cases} I(i, j) - T & I(i, j) > T \\ 0 & I(i, j) \leq T \end{cases}, \quad (4)$$

式中 T 为区分光斑和背景的阈值。

3 成像光斑的数学描述

由于受到光通信终端光学系统孔径光阑的限制,即使没有其他任何因素的干扰,在像面上也得不到一个理想的像点,而是得到一个弥散的光斑。由于光通信终端的视域较小,几何像差对于成像的影响可以通过系统设计进行较好的补偿。文中将终端的光束角度偏差检测光路作为衍射受限系统来考虑,即不考虑光学系统的几何像差,仅仅考虑系统孔径光阑所引起的衍射。

衍射受限系统的脉冲响应是光学系统出瞳的夫琅禾费衍射图样,其中心在几何光学的理想像点处。对于终端的光束角度偏差检测光路:1) 当入射光束平行于主轴入射时,衍射光斑为夫琅禾费圆孔衍射图样,中心在焦点上;2) 当入射光束与主轴成一定倾角入射时,光斑的中心为理想几何像点的位置,相对于主轴有一个偏移量。因此,在光路的焦平面上将得到一个衍射像斑,中心的亮斑为艾里斑,光强分布满足贝塞耳函数,级数表达式为

$$I = I_0 \left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{4^k k! (k+1)!} u^{2k} \right]^2, \quad (5)$$

其中 $u = \pi D \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} / (f\lambda)$, D 为透镜孔径, λ 为入射光波的波长,艾里斑的半径为 $\rho_0 = 1.22 f\lambda / D$,在其外部的像斑能量弱且分布很广,并且在实际测量中易受到噪声的干扰,信噪比较低,故成像中只考虑艾里斑为有效范围。根据上面的分析原则,对光强分布的表达式作近似和变形,结果为

$$I = \begin{cases} I_0 \left[\sum_{k=0}^{10} \frac{(-1)^k}{4^k k! (k+1)!} \left(\frac{1.4884\pi^2 r^2}{\rho_0^2} \right)^k \right]^2 & r \leq \rho_0 \\ 0 & r > \rho_0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, 为光斑的相对尺寸。

4 测角精度与成像光斑尺寸关系分析

重点分析 CCD 像元大小的有限性对测角精度所造成的影响。CCD 输出的是每个像元的灰度值,即每个像元上总的光强。由于像元大小总是有限的,它并不能反映出像元内的各个点的光强信息,因此必然使得 CCD 的测量产生误差。一般而言,CCD 的像元越小,测量的精确度越高。

设安装时使主焦点落在 CCD 面上某一像元的正中心,以主焦点为原点,建立平面直角坐标系。设 CCD 的像元尺寸为 $d \times d$, 每个像素坐标为 (id, jd) , i, j 均为整数。在原点上下左右,各考虑 n 个像素,则构成一个尺寸为 $(2n+1)d \times (2n+1)d$ 的正方形区域。

考虑衍射受限系统,入射光的倾角发生变化时,像面上像斑的光强分布不发生变化。因此,由于 CCD 平面坐标系建立在像素中心,在统计平均误差时,只考虑光斑均匀随机地落在 $1/4$ pixel 中。从图 3 中可以看出,当光斑落在任何一个像素上时,都可

以建立与初始坐标系相同的子坐标系。在这样的子坐标系下讨论光斑形心的测量误差与在原坐标系中完全相同。

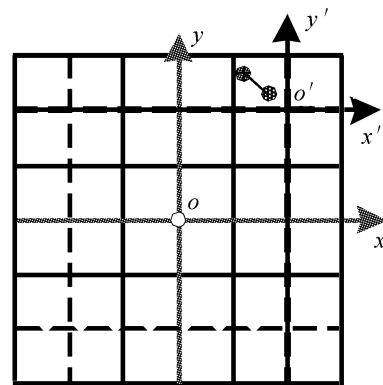


图 3 CCD 平面坐标系

Fig. 3 Coordinate system on CCD

通过积分可以求出每个像素上的光能量

$$W_{ij} = \int_{d(j-1/2)}^{d(j+1/2)} \int_{d(i-1/2)}^{d(i+1/2)} I(x, y, x_0, y_0, \rho) dx dy = W_{ij}(x_0, y_0, \rho_0), \quad (7)$$

式中 $i, j = -n, -(n-1), \dots, n-1, n$ 。利用 CCD 的质心算法,算出光斑形心的位置,与真实值进行比较,就可以得出误差 $\text{Error}(x_0, y_0, \rho_0)$ 。

考虑到卫星光通信的实际情况,假设信标光与主轴的夹角(即入射光的瞄准角度偏差)服从均匀随机分布,可以采取的统计方式表示为

$$\overline{\text{Error}(\rho_0)} = \frac{4}{d^2} \int_0^{d/2} \int_0^{d/2} \text{Error}(x_0, y_0, \rho_0) dx_0 dy_0. \quad (8)$$

其数学过程相当于求一个曲顶柱体的平均高度。可以看出,光通信终端测角的平均误差与光斑的半径及成像位置有关。为使讨论问题方便,定义光斑的相对尺寸为: $r = D/d$ 。

图 4 是光斑相对尺寸取 3 时,测角误差随真实形心变化的分布图, x 和 y 轴为光斑的中心位置坐标(将 CCD 每个像素 10 等分), z 轴表示不同位置对应的测量误差。可以得出如下结论:当光斑中心位于像素的面心、边心、顶角时,误差为零;当其位于 $1/4$ pixel 的正中心时,误差最大,但对测角的影响较小。该结论可以推广到一般情况,同时,光斑相对尺寸越大,则光斑位置分布对于测角的影响越小。

图 5 为平均误差随光斑相对尺寸变化的规律,其中考虑光斑落在 CCD 面上的每个点的概率完全相等情况。分别给出了信噪比为 10, 20, 40 以及没有噪声的情况。可以看出,平均误差随光斑尺寸迅

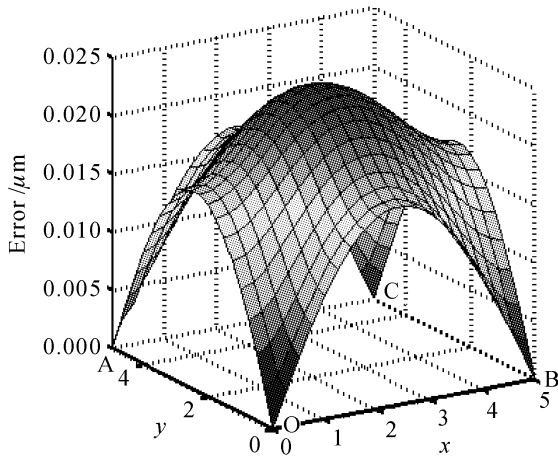


图 4 测量误差随光斑位置的分布

Fig. 4 Distribution of measurement errors with different positions of the spot

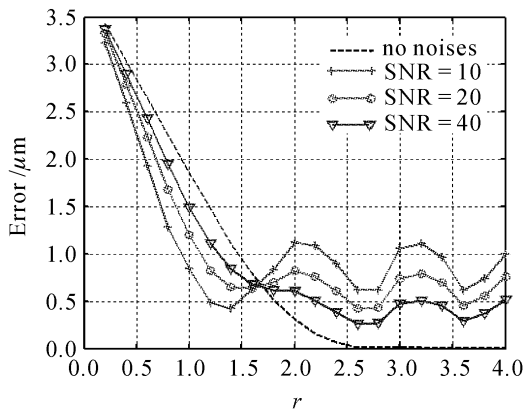


图 5 测量误差随光斑相对半径变化

Fig. 5 Distribution of measurement errors with different relative sizes of the spot

速减小。当光斑相对尺寸大于2.0时,变化的趋势变缓,CCD 像元有限性对测量误差的影响不明显。

5 模拟实验

为进一步说明测角误差与成像光斑半径的关系,在实验室中进行了模拟实验,图 6 为装置示意图。平行光管发出光波长为650 nm的平行光,最大输出功率为10 mW。利用光阑和衰减片结合控制

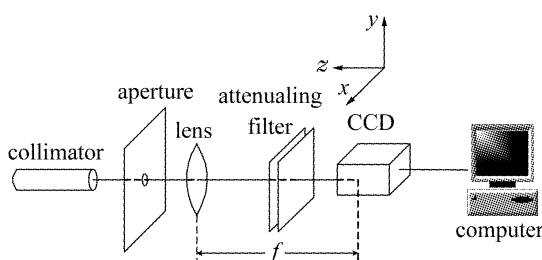


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

CCD 表面的入射光功率。透镜为标准的傅里叶变换透镜,焦距为480 mm。CCD 安装在透镜的焦平面上,像素尺寸为 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$,最大像元数为 640×480 ,图像信号输出到计算机中。

CCD 安装在一个 3 自由度的支架上。支架在 x, y, z 三个方向上的移动由螺旋测微器控制,读数精度 $1 \mu\text{m}$ 。通过在焦平面内平移 CCD,使光斑相对于 CCD 面产生一个相对位移,将这个位移作为真实值;然后用 CCD 质心算法测出光斑移动前的形心位置,作差即可得到光斑位移的测量值。最后,将真实值与测量值进行比较,即可得到 CCD 质心算法测光斑的位移误差。

实验过程中,调整光路使各元件同轴,并使光斑落在 CCD 接收面上接近中央位置。为了降低像差的影响,让人射光近似平行于主轴入射。微调支架 z 轴和孔径光阑,选取合适的衰减片,使 CCD 上接收到的光强衰减到饱和光强以下。最后,设置合适的 CCD 视场采集参数。实验中,尽可能降低激光功率变化、背景光噪声、温度变化、空气流动等影响。

通过控制成像光斑尺寸大小和选择不同像素尺寸 CCD,可以模拟不同光斑相对尺寸情况,但这两种方式都很难实现。为此,设计了一种简单有效的实验方案。首先通过光路调整在 CCD 上成像出较大尺寸的光斑,然后将 CCD 的 $n \times n$ ($n = 1, 2, \dots$) 像素组合成一个像素,即可模拟出不同像素尺寸的 CCD,也就实现了不同光斑相对尺寸情况。同时,为了减少光斑位置对测量的影响,可适当提高 n 值。

实验中 n 的取值为 $8 \sim 36$ 。对于新组合成的像素的灰度值,可以通过它包含的每个小像素的灰度值求和平均得到。CCD 窗口大小为 $792 \mu\text{m} \times 792 \mu\text{m}$,测得光斑的实际大小为 $\phi 320 \mu\text{m}$ 。通过调整 n 值,可模拟出的光斑的相对尺寸在 $0.9 \sim 4.0$ 之间。

将 $n = 1$ 时的测量值作为真实值衡量不同光斑的相对尺寸的测量精度。对于某一 n 值,对应的光斑相对尺寸为 $r = 320 / (9.9 \times n)$ 。设每次设定 n 值后算出的光斑形心位置为 $(x_{i,j}, y_{i,j})_n$, CCD 的测量误差为

$$\text{Error} = \frac{1}{m^2} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=0}^{m-1} \times \sqrt{[(x_{i,j})_n - (x_{i,j})_1]^2 + [(y_{i,j})_n - (y_{i,j})_1]^2}, \quad (9)$$

其中 i 和 j 表示测量过程中 CCD 移动的不同位置,即模拟不同的激光入射角度, m 表示在两个方向移动的次数。实验中 $m = 25$,测得入射到 CCD 上的信

噪比约为 40。图 7 给出了测量结果。可以看出,在光斑相对尺寸大于 2 时,实验曲线已经比较接近于仿真结果,且这时的测量误差也很小,基本为 $1 \mu\text{m}$ 左右。考虑等效透镜焦距为 1 m 的终端,对应的平均测角误差为 $1 \mu\text{rad}$ 。图中当光斑相对尺寸大于 2.5 时,实验曲线为 0,原因是实验设备所限,无法再分辨。

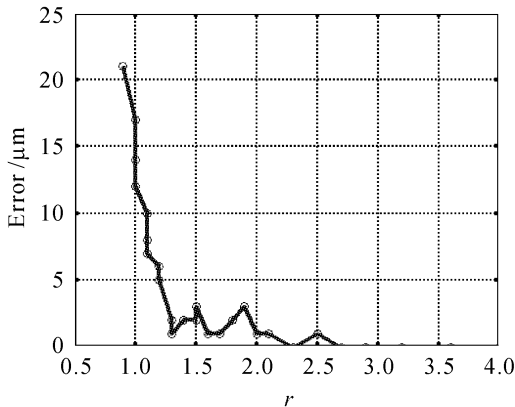


图 7 测量误差随光斑相对半径变化实验结果

Fig. 7 Distribution of measurement errors with different relative sizes of the spot

6 结 论

研究了卫星光通信中,如何在系统设计中选择 CCD 成像光斑弥散圆尺寸的问题。考虑空间光通信终端的入射光信号角度偏差检测装置,给出了成像光斑的数学描述,建立了测角装置仿真数学模型。仿真分析了终端的重要性能参数——测角精度与成像光斑尺寸、成像位置的关系。

为进一步说明问题,在实验室内进行了模拟实验。提出了采用组合 CCD 像素的方式实现不同光斑相对尺寸的方案,实验结果与仿真结果在一定范围内基本一致。对于选定的 CCD 探测器,增大成像光斑尺寸有利于提高测角精度。但当成像光斑尺寸增大到一定程度后,提高的趋势变缓。此时,继续增大成像光斑尺寸将会造成卫星平台资源浪费、系统综合性能下降。综合考虑测角精度、终端功耗等因素,选择光斑相对尺寸在 2 到 3 之间较为合适。

对于卫星激光通信系统,上述的工作在设计和工程化研究方面具有实际的参考价值。今后还可以在像差、光背景噪声及温度(热辐射)等方面进行研究,分析对激光链路成像和测角的影响等问题。

参 考 文 献

- 1 Isaac I. Kim, Brian Riley, Nicholas M. Wong *et al.*. Lessons learned from the STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment [C]. *SPIE*, 2001, **4272**:1~15
- 2 Toni Tolker-Nielsen, Gotthard Opperhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [C]. *SPIE*, 2002, **4635**:1~15
- 3 Steve P. Monacos, Raymond K. Lam, Agnel A. Portillo *et al.*. Design of an event-driven random-access-widening CCD-based camera [C]. *SPIE*, 2003, **4975**:115~125
- 4 Teng Shuyun, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Propagation of Gaussian beam limited by an aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):157~160
滕树云,刘立人,万玲玉等. 孔径光阑限制下高斯光束的传输 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):157~160
- 5 Rong Jian, Hu Yu, Zhong Xiaochun. Study of ATP accuracy and the optimum optical signal transmitting angle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):221~223
荣健,胡渝,钟晓春. ATP 跟瞄精度与最佳信号光发散角的研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):221~223