

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.001

空间激光通信的视轴初始指向系统研究*

刘世涛 曹阳 彭小峰 张勋

(重庆理工大学 电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘要:捕获、对准、跟踪系统是空间激光通信系统的关键技术,是通信链路建立的前提。而视轴初始指向作为捕获系统中的第一步,是能否成功捕获、捕获概率大小以及捕获时间长短的决定性因素。为了快速建立空间激光通信链路,通过分析初始指向技术的组成与工作原理,建立了初始指向系统模型。提出了初始指向系统的视轴标校方法,且根据误差分析方法得到了系统指向精度。实验结果表明,该指向系统可以快速地建立空间激光通信链路,且指向精度高,验证了该指向系统的正确性与可行性。

关键词:空间激光通信;初始指向系统;视轴标校;指向精度

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on line-of-sight initial alignment system in space laser communication

Liu Shitao Cao Yang Peng Xiaofeng Zhang Xun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Acquisition, pointing and tracking is the key technology in space laser communication system. And it is the premise of the communication link establishment. The initial alignment as the first step in the acquisition system is the decisive factor for the success of the acquisition, the acquisition probability, and the length of time. To quickly establish the space laser communication link, the initial alignment system model is established by analyzing the composition and working principle of the initial alignment technique. Calibration method on initial alignment line-of-sight is proposed, and the system alignment accuracy is obtained according to error analysis method. The experimental results show that the alignment system can quickly establish the space laser communication link, and it has high alignment accuracy, which verifies the correctness and feasibility of the alignment system.

Keywords: space laser communication; initial alignment system; line-of-sight calibration; alignment accuracy

1 引言

空间激光通信不仅传输速率高、协议透明、通信容量大、保密性和抗干扰能力强,而且体积小、重量轻和低功耗,这些特点使其在民用、军事通信领域都得到了广泛的应用^[1]。捕获、对准、跟踪(acquisition, pointing, tracking, APT)分系统是空间激光通信系统的关键技术和核心单元,主要完成两运动平台间视轴快速、高概率的捕获对准以及高精度与高动态性的跟踪^[2],是通信链路能否建立

以及通信链路维持时间长短的前提与决定条件^[3]。而视轴初始指向作为捕获系统中的第一步,决定了是否能够成功捕获、捕获概率的大小以及捕获时间的长短,因此具有非常重要的研究意义。文献[4]从地面两个固定通信终端的捕获系统出发,通过解算GPS坐标信息建立了视轴初始指向系统模型,但指向精度低,不能很好地满足系统的精度要求;文献[5]通过解算GPS坐标得到空间激光通信终端初始指向的方位角与俯仰角,进而驱动二维转台快速指向目标,虽然该系统可以快速地实现视轴初始指向,但是不能实现实时地指向与捕获;文献[6]分析

了由 GPS/INS 组合导航构成的初始指向系统的组成原理、指向误差以及捕获时间,实验通过解算 GPS/INS 坐标信息进而实现通信双方的视轴指向,但测试实验表明指向误差较大、捕获时间较长。

所以,为了提高空间激光通信的视轴初始指向精度,本文分析了指向系统的组成与工作原理,给出了初始指向系统模型以及视轴标校方法,进而得到较高的视轴指向精度,最后通过实验验证了该指向系统性能的快速性与正确性。

2 视轴初始指向系统

2.1 系统组成

视轴初始指向系统主要由 GPS/INS 组合模块、PC、TMS320F2812 处理器、二维转台、CCD 相机、激光器等组成^[7-8],结构如图 1 所示。GPS/INS、PC 以及 TMS320F2812 三者之间进行串口通信,CCD 相机与激光器安装在二维转台上,激光照射在幕墙上形成靶标。

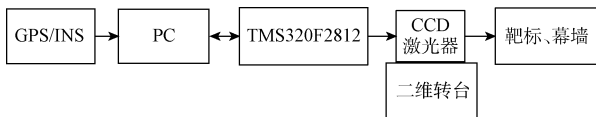


图 1 视轴初始指向系统组成

Fig. 1 Constitution of initial alignment system

2.2 工作原理分析

视轴初始指向示意图^[9-10]如图 2 所示。

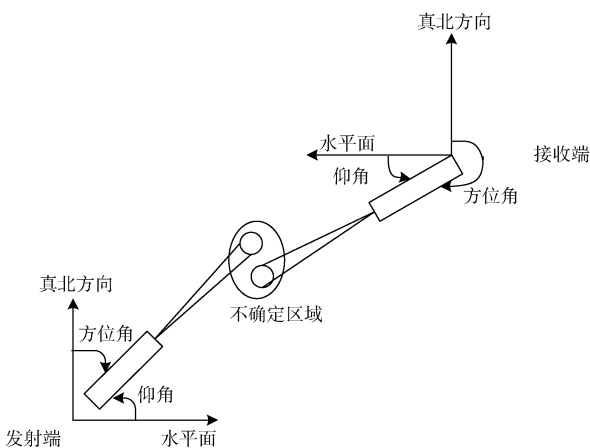


图 2 视轴初始指向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of initial alignment

图 2 所示发射端与接收端处于初始位置,收发双方发射信标光在不确定区域内进行捕获对准。由图 2 可知,其工作原理是首先由 GPS/INS 系统实时得到通信双方的位置与姿态信息,然后由指向算法中的坐标转换过程得到双方视轴需要旋转的方位角和俯仰角,最后经过 TMS320F2812 对此角度信息进行处理,控制二维转台从初始零位开始转动,进而使视轴指向对方。

3 指向系统模型及视轴标校

3.1 指向系统数学模型

3.1.1 空间坐标转换过程

1) A_0 、 A_1 是由 GPS/INS 系统得到的在 WGS-84 坐标系下两个运动平台的坐标^[11-13],分别为 (B_0, L_0, H_0) 、 (B_1, L_1, H_1) ;其中 B_0 、 B_1 、 L_0 、 L_1 、 H_0 、 H_1 分别为 A_0 和 A_1 的纬度、经度和海拔高度。根据式(1)和(2)可将 A_0 、 A_1 的坐标转换成在地心直角坐标系下的坐标,分别为 (x_0, y_0, z_0) 、 (x_1, y_1, z_1) 。

$$\begin{cases} x = (N + H) \cos B \cos L \\ y = (N + H) \cos B \sin L \\ z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (1)$$

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (2)$$

式中: N 是法线长度, a 是地球长半径(WGS-84 坐标下约为 6 378 137 m), e^2 是子午椭圆第一偏心率(约为 0.006 694 379 995)。

在空间直角坐标系下两个运动平台之间的距离如下:

$$D = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (3)$$

2) 根据式(4)可将地心直角坐标系下 A_1 的坐标转换成以 A_0 为坐标原点的平台坐标系下的坐标。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(B_1) \cos(L_1) & -\sin(B_1) \sin(L_1) & \cos(B_1) \\ -\sin(L_1) & \cos(L_1) & 0 \\ \cos(B_1) \cos(L_1) & \cos(B_1) \sin(L_1) & \sin(B_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 令通信平台坐标系与参心坐标系相应坐标轴之间的夹角分别为通信平台的横滚角 φ 、俯仰角 θ 和航向角 ψ 。则在平台坐标系下,由式(5)可将 A_1 的坐标转换成以 A_0 为坐标原点的参心坐标系下的坐标。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\varphi \sin\theta \cos\psi + \cos\theta \sin\psi & \sin\varphi \sin\theta \sin\psi + \cos\theta \cos\psi & \cos\varphi \sin\theta \\ \cos\varphi \cos\psi & -\cos\varphi \sin\psi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi \cos\theta \cos\psi - \sin\theta \sin\psi & -\sin\varphi \cos\theta \sin\psi - \sin\theta \cos\psi & \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.1.2 随动指向角的计算

由式(6)可得到方位轴、俯仰轴方向上的指向角。其中方位角 m_yaw 在 $\pm 180^\circ$ 之间且选取顺时针方向为正;而俯仰角 m_pitch 在 $\pm 90^\circ$ 之间且方向向上为正。

$$\begin{cases} m_yaw = 180^\circ \times \arctan(Y, X) / \pi \\ m_pitch = 180^\circ \times \arctan(Z / \sqrt{Y^2 + X^2}) / \pi \end{cases} \quad (6)$$

3.2 视轴标校

视轴标校主要是补偿仪器安装误差以及角度测量误差。实现方法是完成系统安装后,视轴归零,首先通过 GPS 测量得到自身位置坐标与远处目标点的位置坐标,然后由初始指向系统数学模型根据得到的两个坐标点解算出二维转台需要转动的方位角与俯仰角,最后由 TMS320F2812 控制转台使视轴指向目标点。

但是由于误差的存在,无法实现目标点在 CCD 中心成像^[14-15]。所以令目标点移动到 CCD 中心时转台需要转动的方位角为 $\Delta\psi$,俯仰角为 $\Delta\theta$,则 $\Delta\psi$ 、 $\Delta\theta$ 就是系统的误差,可对指向过程进行标校。即:

$$\begin{cases} \psi_1 = m_yaw + \Delta\psi \\ \theta_1 = m_pitch + \Delta\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中: ψ_1 、 θ_1 即为指向过程中实际的视轴指向角度。

3.3 指向精度

由视轴初始指向系统模型可知,系统定位误差 α_1 、姿态角误差 α_2 、转台指向误差 α_3 、平台误差 α_4 与动态滞后误差 α_5 为影响指向精度的主要因素。则根据误差合成原理,可得指向精度为:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \alpha_4^2 + \alpha_5^2} \quad (8)$$

4 测试实验与结果分析

以移动平台为例进行实验验证,实验条件:在重庆理工大学图书馆设置目标点 A,将载有 GPS/INS 与转台等实验设备的移动平台终端放置在第一实验大楼,二者通信距离为 2 km, GPS/INS 更新速率为 50 Hz,转台转动角速度为 $5^\circ/\text{s}$,平台移动速度为 3 m/s, GPS 定位误差为 0.85 mrad,视轴修正时选择通信距离为 1 km 得到 $\Delta\psi = -0.14^\circ$ 与 $\theta = 0.18^\circ$,为了保证指向精度、时间的精确性,二维转台的转动速度根据调整角度的大小而自动调整。通过移动平台位置的变化,测试不同调整角度的二维转台转动时间,进而得到不同方位角与俯仰角的视轴指向时间^[16],如图 3 和 4 所示。

由图 3 可知,方位角的角度变化范围是 $-180^\circ \sim +180^\circ$,随着转台调整角度的增大,指向时间也相应的增加,且正、负方向旋转相同的角度时所需要的时间基本是相同的, $-50^\circ \sim -100^\circ$ 与 $+50^\circ \sim +100^\circ$ 的指向时间呈

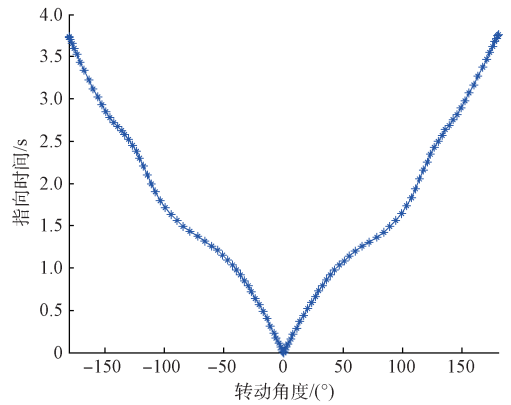


图 3 方位角不同转动角度对应的指向时间

Fig. 3 Corresponding alignment time to the different rotation angle of azimuth angle

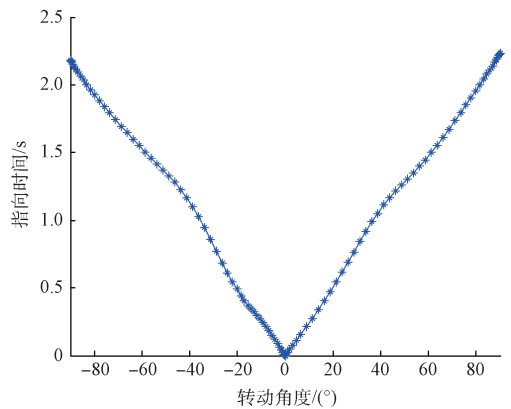


图 4 俯仰角不同转动角度对应的指向时间

Fig. 4 Corresponding alignment time to the different rotation angle of pitch angle

平缓增加的趋势,而方位角转动角度为 180° 时的指向时间最长为 3.7 s;由图 4 可知,俯仰角的角度变化范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$,随着角度增大指向时间呈均匀增加的趋势,且俯仰角转动角度为 90° 时的指向时间最长为 2.2 s。所以,由以上数据可知,该视轴指向系统可以快速地实现通信终端的视轴初始指向。

为了确定该指向系统的指向精度,测试了不同时刻方位角、俯仰角的转台转动值与实际值之间的指向误差^[17-18],取其中一段时间为例,如图 5 和 6 所示。从图 5 中可知,方位角的指向误差变化范围是 $-0.26^\circ \sim +0.2^\circ$, 28 ~ 40 s 时误差较大且时间为 30 s 时达到最大指向误差为 0.26° ;从图 6 中可知俯仰角的指向误差变化范围是 $-0.17^\circ \sim +0.28^\circ$, 40 ~ 50 s 时误差较大且时间为 42 s 时达到最大指向误差为 0.28° 。该数据结果可以满足空间激光通信视轴初始指向系统的精度要求,表明了该指向系统的正确性与可靠性。

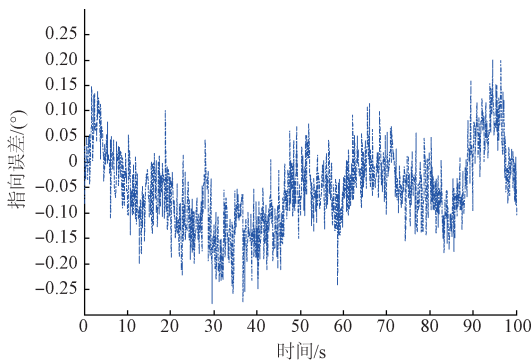


图5 方位角指向误差图

Fig. 5 Alignment error of azimuth angle

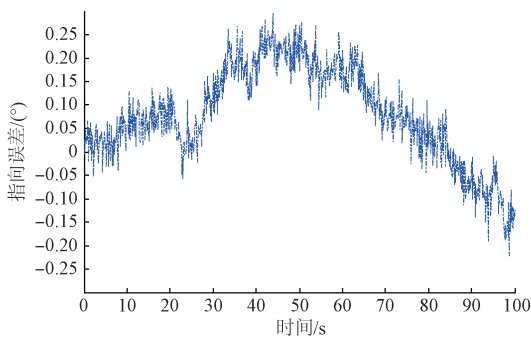


图6 俯仰角指向误差图

Fig. 6 Alignment error of pitch angle

5 结论

本文通过对空间激光通信系统视轴初始指向技术的研究,给出了初始指向系统模型以及视轴标校方法,并通过移动平台进行指向系统的性能与指向精度的实验验证。实验结果证明了该指向系统的正确性和可靠性,可以快速地实现空间激光通信系统的视轴初始指向,并且具有较高的指向精度。

参考文献

- [1] 佟首峰,姜会林,刘云清,等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. 光电工程,2007,34(9):16-20.
TONG SH F,JIANG H L,LIU Y Q, et al. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication [J]. Opto-Electronic Engineering,2007,34(9):16-20.
- [2] 李一芒,盛磊,陈云善. 高速激光光斑检测系统的设计与实现[J]. 激光技术,2015,39(4):533-536.
LI Y M, SHENG L, CHEN Y SH. Design and implementation of high-speed laser spot detection

systems [J]. Laser Technology,2015,39(4):533-536.

- [3] 赵雪,母一宁,姜非欧,等. GPS/INS 技术在静态激光通信初始捕获中的应用[J]. 激光与红外,2012,42(5):505-509.
ZHAO X, MU Y N, JIANG F O, et al. Application of GPS/INS technology in the initial capture of static laser communication [J]. Laser & Infrared, 2012, 42 (5) : 505-509.
- [4] LU G, LU Y M, DENG T P, et al. Automatic alignment of optical beam based GPS for free-space laser communication system [C]. SPIE, 2004 : 432-438.
- [5] 姜茹,艾勇,单欣,等. 空间光通信中 GPS 辅助快速捕获对准技术[J]. 光通信技术,2015,39(4):47-49.
JIANG R, AI Y, SHAN X, et al. GPS aided fast acquisition and pointing technology for space laser communication [J]. Optical Communication Technology, 2015, 39 (4) : 47-49.
- [6] EPPLE B. Using a GPS-aided inertial system for coarse pointing of free-space optical communication terminals [C]. SPIE, 2006 : 630418.
- [7] 王娟娟. 基于 GPS/INS 运动二维转台的指向技术研究 [D]. 济南:山东大学,2014:1-60.
WANG J J. Research on pointing technology of two-dimension rotating platform based on GPS/INS [D]. Ji'nan; Shandong University, 2014 : 1-60.
- [8] 石小丽,贾建军,张亮. 一种基于幕墙反射激光光斑的空地 ATP 粗跟踪动态性能测试方法 [J]. 科学技术与工程,2013,13(17):4951-4955.
SHI X L, JIA J J, ZHANG L. A free-space ATP coarse tracking system dynamic performance test method which based on the curtain wall reflected laser spot [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (17) : 4951-4955.
- [9] 赵馨,刘云清,佟首峰. 动态空间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 X, LIU Y Q, TONG SH F. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5):0505009.
- [10] 左韬,艾勇,聂桂根,等. 基于 GPS 的星地激光通信捕获对准研究 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(8):1184-1188.
ZUO T, AI Y, NIE G G, et al. Research on acquisition and pointing in optical communication between satellite and ground station based on GPS [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21 (8) : 1184-1188.
- [11] 韩成,佟首峰,陈展东,等. GPS/INS 系统误差对空间激光通信对准算法的影响分析 [J]. 红外与激光工程,

- 2009, 38(4): 650-654.
HAN CH, TONG SH F, CHEN ZH D, et al. Analysis of influence of GPS/INS system errors on pointing algorithm in space optical communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 650-654.
- [12] 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.
ZHAO X, SONG Y S, TONG SH F, et al. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
- [13] 腾云万里, 王跃科, 陈建云, 等. 星间链路建链指向算法研究与性能验证 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 96-100.
TENG Y W L, WANG Y K, CHEN J Y, et al. Inter-satellite link directivity algorithm research and performance validation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 96-100.
- [14] 钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
QIAN F, JIA J J, ZHANG L, et al. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking pointing system [J]. Chinese Journal Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
- [15] 于萍, 薛向尧. 激光发射系统光束指向检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1185-1189.
YU P, XUE X Y. Study on the measurement method of laser pointing error for the lasing system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1185-1189.
- [16] 肖永军, 董冉, 熊准, 等. 无线光通信 GPS 辅助定点捕获实验研究 [J]. 半导体光电, 2011, 32(6): 833-836.
XIAO Y J, DONG R, XIONG ZH, et al. Research on fixed-point acquisition in optical communication based on GPS [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(6): 833-836.
- [17] 韩成, 白宝兴, 赵馨, 等. 自由空间激光通信捕获控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 91-95.
HAN CH, BAI B X, ZHAO X, et al. Acquisition control system of free space laser communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 91-95.
- [18] 赵雪. 空间激光通信 APT 初始捕获及误差分析 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 1-56.
ZHAO X. The APT initial capture and error analysis of space laser communication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 1-56.

作者简介



刘世涛, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事自由空间激光通信技术的研究。

E-mail: 1506882931@qq.com

Liu Shitao was born in 1987, M. Sc. candidate. He is mainly engaged in research on free space laser communication technology.



曹阳 (通讯作者), 1977 年出生, 副教授, 博士后, 主要从事自由空间激光通信技术的研究。

E-mail: caoyjz@cqut.edu.cn

Cao Yang (Corresponding author) was born in 1977, associate professor, post-Ph. D. He is mainly engaged in research on free space laser communication technology.