

自由空间光通信系统中 ATP 技术的研究

尹道素 皮德忠 李 贤 熊金涛

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

提要 对目标的捕获、跟踪和瞄准(Acquisition, Tracking, Pointing-ATP)技术进行了理论分析和实验研究,ATP 实验系统光路的主要参数为:信标光束散角: $2\alpha = 5 \text{ mrad}$;光接收天线视场: $2\beta_{\omega} = 10 \text{ mrad}$;搜索扫描范围: $2\alpha \geq \pm 1^\circ, 2\beta \geq \pm 1^\circ$;安装天线误差: $\leq 0.5^\circ$ 。并在 1.6 km 距离上进行了实验验证,实验结果与理论分析基本一致。

关键词 空间光通信,捕获,跟踪,瞄准

1 引 言

随着激光技术及相关单元技术的发展,它在军事武器、雷达、测控及通信领域展示了广阔的应用前景。由于激光束定向性能特别好,经光学系统后的激光束的发散角往往只有 0.1~0.5 mrad。把如此小角度的激光束发射对准目标,必须对目标进行高精度的跟踪,特别是对运动目标的捕获、跟踪和瞄准(ATP)就成为激光系统的一大关键技术,这也是目前国际上在这一领域的研究热点。本文对自由空间激光通信系统中的 ATP 技术作了初步研究和分析,建立了 ATP 系统物理模型,进行了实验研究,获得了理想的实验结果。

2 ATP 技术研究

2.1 捕获、跟踪、瞄准

由于发射激光束较窄,不象电磁波那样能充满很宽的空间。因此,对目标的捕获是通过向目标所在的一定空间范围内进行搜索扫描来实现的。在通信过程中,通信双方约定一方为主站 A,另一方为副站 B,即由 A 发射信标光,B 接收,如图 1 所示。系统扫描的角度空间为 $(2\alpha, 2\beta)$,对应的扫描空间面积分别为 $(2R\beta)^2$ 和 $(2R\alpha)^2$ 。常用的扫描方式有两种,即平面扫描和螺旋扫描^[1]。

2.1.1 平面扫描

A 站发射的信标光进行快速的行场扫描,B 站则作跳步接收。A 站每扫一场,B 站跳步一次,如图 2 所示。B 站每步转动的角度为 $2\beta_{\omega}$,设信标光扫描的场周期为 t_d ,则 B 站在一个扫描行的跳步数

$$b = \beta/\beta_{\omega}$$

最大捕获时间

$$\tau_{acq} = b^2 t_d$$

图 1 捕获的几何示意图

2α 为 A 站天线的转动范围(A 对于 B 的最大角度误差); 2β 为 B 站天线的转动范围(B 对于 A 的最大角度误差); $2\alpha_0$ 为信标光束的宽度; $2\beta_w$ 为 B 站的接收视场; R 为 A, B 间的距离

Fig. 1 Schematic of acquisition geometry

2α is the scan range of the station A antenna; 2β is the scan range of the station B antenna; $2\alpha_0$ is the width of the beacon; $2\beta_w$ is the receiver's view field; and R is the distance between A and B

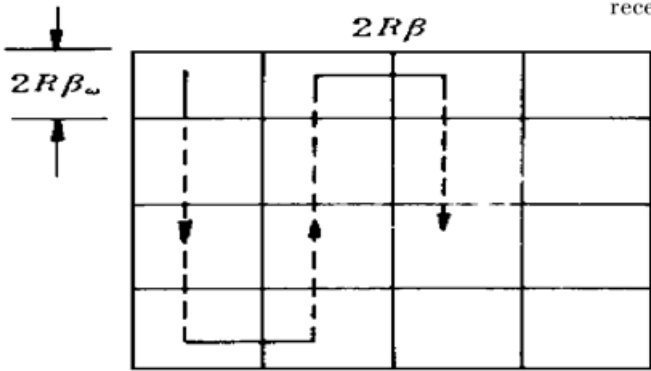
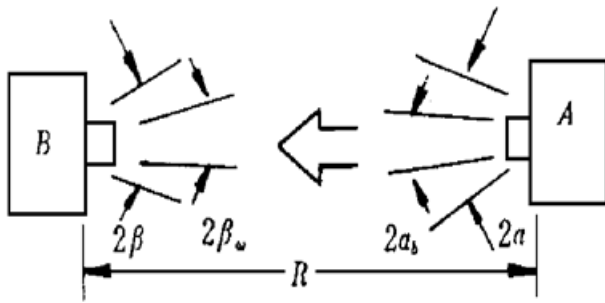


图 2 平面扫描方式

Fig. 2 Square scanning patterns

2.1.2 螺旋扫描

另一种扫描方式为螺旋扫描,即 A 站信标光以螺旋的方式向 B 所在的空间进行旋转扫描, B 站仍跳步接收。这种扫描方式的驱动信号较为复杂,但相应的捕获时间就可减少。设信标光的场扫描周期仍为 t_d , 则最大捕获时间为

$$t_{acq} = b_s^2 t_d$$

其中 $b_s^2 = \pi/4b^2$ (系统 B 在捕获过程中的总跳步数)

B 站一旦捕捉到 A 站来的信标光,便调整自己的天线,对准收到信标光的方向,并发射信标光, A 站一旦收到 B 站来的信标光,便完成捕获,继而转入跟踪和瞄准。

系统一旦捕获到目标,便立即停止快速扫描,双方天线互逆调整,瞄准目标。当目标运动时,天线也跟着转动,对目标进行跟踪。

2.2 ATP 控制系统

激光束对目标的捕获、跟踪和瞄准都是在一个机械系统控制下进行的,控制系统的精度直接影响激光束的跟瞄精度。要实现高精度的跟瞄,必须采用双回路控制系统^[2,3],如图 3 所示。一是光反馈回路,又称外环路,控制误差信号来自定位探测器,经放大和计算机处理,产生一个伺服驱动信号,驱动天线朝着互相对准的方向转动,实现对目标的捕获、跟踪和粗

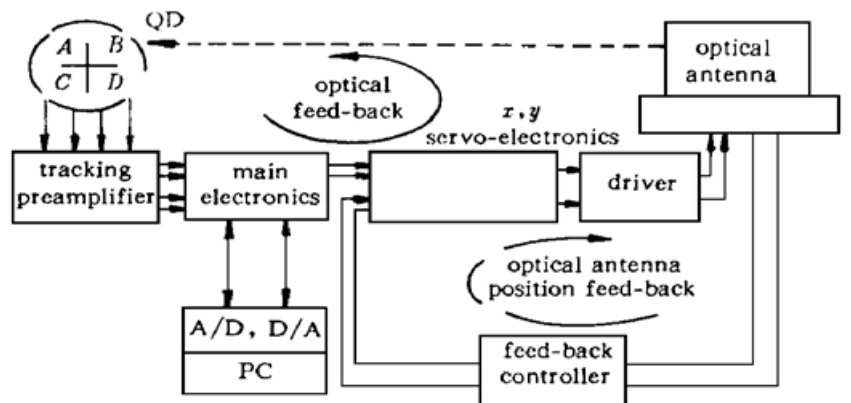


图 3 ATP 系统框图

Fig. 3 Block diagram of the ATP system

定位。另一个回路是天线位置反馈回路,称为内环路,误差信号直接从天线的角度位置提取,这就从内部进一步保证天线位置的相对稳定性,实现高精度跟瞄。特别是对于车载、军舰等运动目标的跟瞄,由于传播路径不好引起的抖动,可由内环路实现对天线平台的稳定,减小抖动误差。如果伺服系统采用力矩电机,反馈控制器用测速电机实现,则 ATP 控制系统传递函数为

$$H(S) = \frac{k_1 G_1(S)}{1 + \beta k_1 G_1(S) + G_1(S) G_2(S)}$$

其中, k_1 为内环路放大系数; β 为外环路的放大系数;

$$G_1(S) = \frac{k_2}{k_3 S + k_4}$$

为力矩电机传递函数,其系数 k_2, k_3, k_4 由力矩电机确定;

$$G_2(S) = \frac{k_5 S}{k_6 S + k_7}$$

为测速电机传递函数,其系数 k_5, k_6, k_7 由测速电机确定。一旦电机型号选定,传递函数便可确定下来。

2.3 误差信号处理

ATP 伺服系统是由天线位置误差信号控制的,误差信号的检测常用电荷耦合器件 (CCD)^[4]、四象限探测器(QD)等光电器件来实现。这里以 QD 为例,讨论误差信号的检测和处理,如图 4~6 所示。四个探测器的输出与受照光斑面积有关,经 A, B, C, D 通道放大归一化后,水平方向误差电压为

$$V_x = \frac{K[(B + D) - (A + C)]}{(A + B + C + D)} = 2K \left[\frac{x}{r} \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}} + \arcsin \left[\frac{x}{r} \right] \right] / \pi \quad (1)$$

式中, A, B, C, D 代表四个探测器的输出, K 为电路放大系数。同理,垂直方向误差电压为

$$V_y = \frac{K[(A + B) - (C + D)]}{(A + B + C + D)} = 2K \left[\frac{y}{r} \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}} + \arcsin \left[\frac{y}{r} \right] \right] / \pi \quad (2)$$

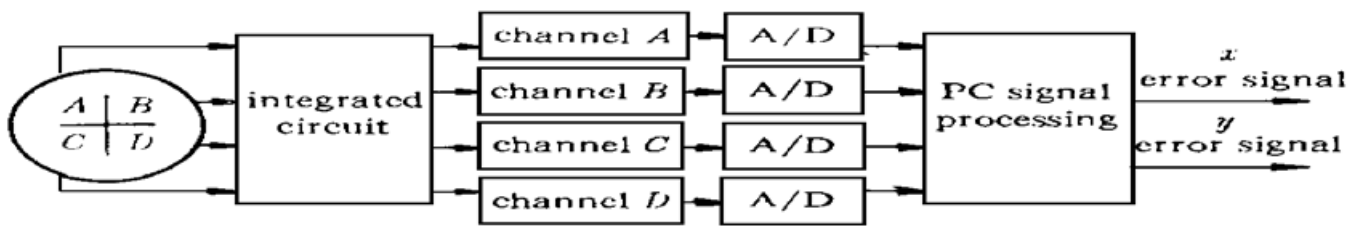


图 4 误差信号处理电路

Fig. 4 Error-signal processing circuit

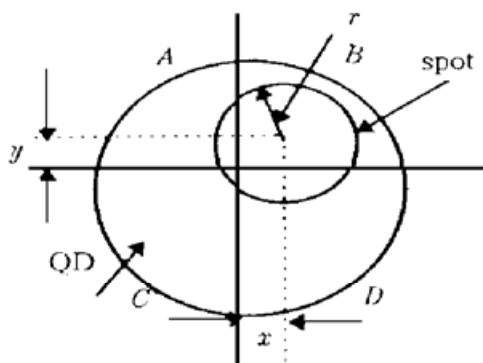


图 5 QD 误差形成原理

r 为光斑半径; x 为水平方向位移; y 为垂直方向位移

Fig. 5 QD error formation

r is the radius of the optical spot; x is horizontal deviation of the optical spot, and y is vertical deviation of the optical spot

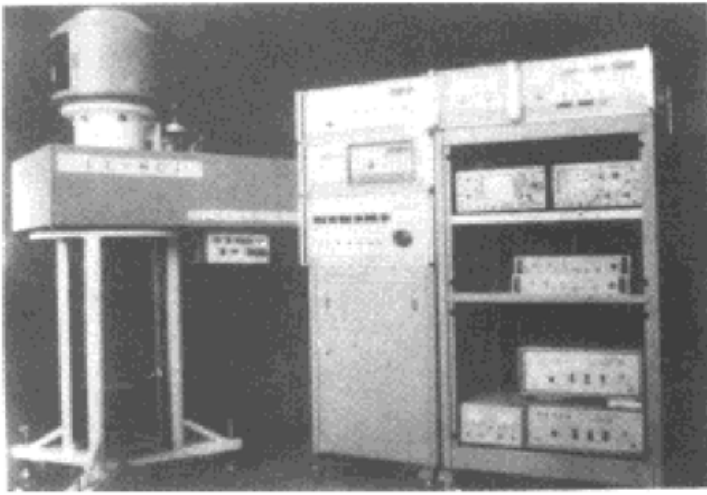


图 6 实验演示系统

Fig. 6 Experimental system

由(1)和(2)式可以看出,当光斑中心偏移四像限探测器中心时,将产生水平或垂直方向的误差电压,用此误差电压控制伺服机构,使天线转动,直到天线对准目标。

2.4 实验系统

根据上述理论分析,我们进行了实验演示,演示系统如图 6 所示。ATP 实验系统光路的主要参数为:信标光束散角: $2\alpha = 5$ mrad; 光接收天线视场: $2\beta = 10$ mrad; 搜索扫描范围: $2\alpha \geq \pm 1^\circ, 2\beta \geq \pm 1^\circ$; 安装天线误差: $\leq 0.5^\circ$ 。

在捕获过程中,主站 A 进行行场扫描,副站 B 跳步接收。目标距离 $R = 2$ km, 相应的

扫描面积 $(2R\alpha)^2$ 为 50 mrad \times 50 mrad, B 站扫描一行的跳步数 $b = 5$, A 站扫描周期 $t_d = 5$ s, 系统最大捕获时间为

$$t_{acq} = b^2 t_d = 5^2 \times 5 = 125 \text{ s}$$

一般情况下,小于上述时间。

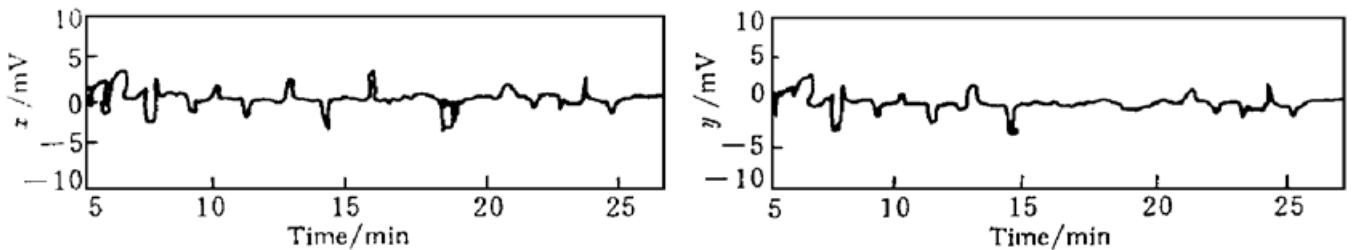


图 7 跟瞄误差信号

Fig. 7 Tracking error

实验系统选用功率为 5 W 的 CO₂ 激光器作光源,经过调试,系统能在 1.6~ 5 km 距离上实现对目标的跟踪,在气象条件良好的情况下,测得跟瞄状态下 ATP 控制系统误差信号 x, y 如图 7 所示。并在 1.6 km 距离上进行了通信实验,传输码率 8.448 Mbit/s,用误码仪测试系统通信误码率,图 8 所示为其中一次实验的测试结果。由误码率的数值可以看出,系统能实现对目标的精确跟踪。

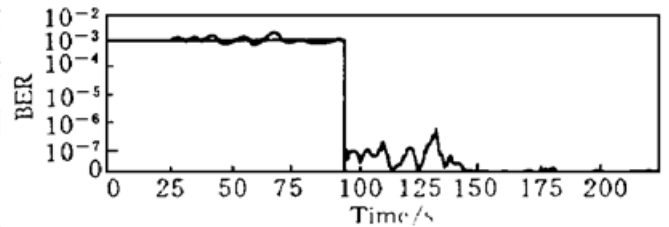


图 8 实验测试误码率

Fig. 8 Experimentally measured results

致谢 本论文完成过程中,得到我国空间光通信专家胡渝教授和空间光通信研究组曾广荣高工、卢国纬副教授等人的大力帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

1 Morris Katzman, Ed. . Laser Satellite Communications, Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, NJ 07632,

1987

- 2 Victor A. Skormin, Carl R. Herman, Mark A. Tascillo *et al.*. Mathematical modeling and simulation analysis of a pointing, acquisition, and tracking system for laser-based intersatellite communication. *Opt. Engineering*, 1993, **32**(11): 2749~ 2763
- 3 Victor A. Skormin, Mark A. Tascillo, Timothy E. Busch. Adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication systems. *Opt. Engineering*, 1995, **34**(5): 1263~ 1268
- 4 Samuel I. Green. Acquisition and tracking with a charge-coupled device. *SPIE*, 1994, **2123**: 316~ 326

Acquisition, Tracking, and Pointing Technology in Free Space Laser Communications System

Yin Daosu Pi Dezhong Li Xian Xiong Jintao

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

Abstract The Acquisition, Tracking and Pointing (ATP) technology is one of the key technologies in the free-space laser communications system. This paper analyzes the ATP theory, and obtained results from experiment. The key parameters of the experimental system are: (1) beacon divergence, $2\alpha = 5$ mrad; (2) receiver field of view, $2\beta_{\omega} = 10$ mrad; (3) angular coverage, $2\alpha \geq \pm 1^{\circ}$, $2\beta \geq \pm 1^{\circ}$. The results of the experimental demonstration show that the system can work well in the distances of 1.6~ 5.0 km. The results accurately match the theoretical analysis.

Key words free-space laser communication, acquisition, tracking, pointing