

文章编号: 0258-7025(2002)06-0498-05

激光星间链路中天线扫描捕获技术 实验室模拟研究

于思源, 马 晶, 谭立英, 高惠德, 马祖光

(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)

提要 对激光星间链路中的天线扫描捕获技术进行了理论分析和模拟实验研究。首先建立了天线扫描捕获理论模型,在此基础上对影响系统捕获性能的各主要参量之间关系进行了数值仿真分析。设计实现了一套天线扫描捕获实验室模拟系统,通过模拟实验对部分数值分析结果进行了验证,实验结果与数值分析结果基本符合。

关键词 激光星间链路, 天线扫描捕获, 捕获概率, 捕获时间

中图分类号 TN 929.1 文献标识码 A

Experimental Study of Acquisition with Antenna Scanning in Intersatellite Laser Links

YU Si-yuan, MA Jing, TAN Li-ying, GAO Hui-de, MA Zu-guang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract In this paper, the acquisition with the antenna scanning in intersatellite laser links was studied both in theory and simulation. A theorized model for acquisition was given, and some parameters that influence the system of acquisition were analyzed. In order to verify the analytical outcomes, a simulation system of the acquisition in the laboratory was built. The results from the tests accord well with those from the theoretical analysis.

Key words intersatellite laser links, acquisition with the antenna scanning, acquisition probability, acquisition time

1 引 言

与微波通信相比,激光星间链路系统具有信息量大、体积小、重量轻、抗干扰能力强以及保密性好等优点,是未来宽带卫星通信的主要发展方向^[1]。在激光星间链路系统中,由于信号光束的束宽小、传输距离长等原因,瞄准、捕获和跟踪(Pointing, Acquisition and Tracking(PAT))问题变得尤为突出。不精确的光束跟瞄将导致接收端信号大量丢失和系统性能的严重下降,甚至使链路中断。因此 PAT 是激光星间链路的关键技术之一,必须有专门的 PAT 控制系统来减小由于指向误差而产生的信号损失。天线扫描捕获是 PAT 中的关键技术之一,主要用于两星之间链路的建立以及链路中断时的恢

复。从国外的文献中可以看出,由于星上环境及系统性能等因素,天线扫描捕获技术仍是研究的重点和难点之一^[2,3]。

激光星间链路是一个较新的研究领域,越来越得到各国政府的重视。美国、欧洲、日本等已全面开展了这方面的研究,最近已进入空间试验阶段。在理论分析方面,美国喷气动力试验室(JPL)的 C. C. Chen 等提出了星间链路中激光光束跟瞄的偏差可以假设为 Rayleigh 分布^[4]。此后,以色列的 S. Arnon 等在此基础上分析了 PAT 中的跟踪系统^[5,6]。最近,Michael Scheinfeld 等讨论了影响捕获的几种因素,但未作进一步研究^[7]。考虑到在瞄准捕获过程中信标光的位置是随时间变化的随机量,本文引入了信标光位置预测角方向偏差,并假设

收稿日期 2001-04-02;收到修改稿日期 2001-08-20

作者简介:于思源(1974—),男,黑龙江省人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事卫星光通信技术研究。E-mail: yusiyuanhit@sina.com

该角度偏差变化是随机的,为使问题简化,将其描述为 Rayleigh 分布。文中从理论和模拟实验两方面对天线扫描捕获技术进行了初步研究:首先建立捕获理论模型;在此基础上通过数值仿真分析了星上环境及系统内部性能等因素对捕获的影响;最后通过模拟实验对部分仿真结果进行了验证。

2 理论模型

与雷达天线扫描捕获不同,在激光星间链路中两星间可通过主动配合来实现捕获,并且可利用已知的卫星轨道参数缩小捕获范围。但由于激光束宽度窄,捕获难度较大,此外还要考虑到卫星姿态稳定性以及星上振动的影响。为此,在进行实验研究之前,有必要建立相应的天线扫描捕获理论模型。

设终端 A 为信标光发射端,终端 B 为天线扫描捕获端。捕获定义:将终端 B 的接收天线瞄准在终端 A 光场到达的方向^[8]。

以终端 B 接收望远镜光阑中心为原点,建立星上运动坐标系 (ρ, A_z, E_l) ,其中的三个量分别表示斜距、方位角和俯仰角(图 1)。在该坐标系中,信标光的预测角方向与实际角方向间有一定的偏差 $\vartheta_\sigma(A_z, E_l)$,产生 $\vartheta_\sigma(A_z, E_l)$ 的因素有:轨道误差、姿控误差、瞄准误差、热形变误差、装配校正误差等,其中前两项为主要因素。

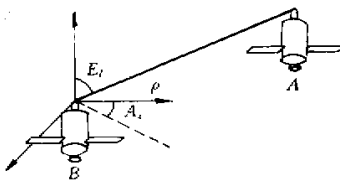


图 1 坐标系示意图

Fig.1 Diagram of the coordinate

由于扫描过程中两终端应一直对两星间的相对运动进行补偿,在一次扫描过程中可以认为 $\vartheta_\sigma(A_z, E_l)$ 的大小不变。我们假设: $\vartheta_\sigma(A_z, E_l)$ 在 A_z 和 E_l 两个方向上相互独立且服从同一正态分布 $N(0, \sigma^2)$ ^[4]。暂不考虑信标光束散角内光强变化及噪声的影响,在扫描角度范围 Ω_u 内的捕获概率为

$$P_A = \iint_{\Omega_u} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(A_z^2 + E_l^2)}{2\sigma^2}} dA_z dE_l \quad (1)$$

激光光束属于针状波束,按扫描时波束在空间

的运动规律,可采用的扫描方式有分行扫描、锯齿形扫描和螺旋扫描等。图 2 为采用分行扫描方式时的扫描轨迹,其中 Ω_r 为捕获分辨率,与终端 B 的探测视阈有关。通常 Ω_u 和 Ω_r 为毫弧度量级,可对其进行小角度近似。在 Ω_u 内的扫描行数为

$$N_S \approx \frac{\sqrt{\pi\Omega_u}}{2\sqrt{\Omega_r}(1-\xi)} \quad (2)$$

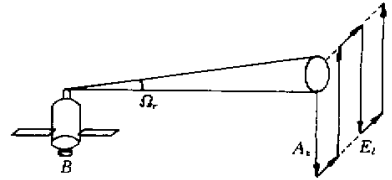


图 2 分行扫描轨迹

Fig.2 Trajectory of the scan in row

设 A_z 和 E_l 扫描范围相同,则天线扫描的最大捕获时间为

$$T_A \approx \frac{N_S^2 N_A}{F_A} = \frac{\pi\Omega_u^2 N_A}{4(1-\xi)^2 \Omega_r F_A} \quad (3)$$

其中 F_A 为系统带宽。 N_A 为扫描场次,由瞄准偏差、卫星姿态精度等因素决定,若在扫描捕获期间,终端 B 的捕获天线始终在终端 A 信标光的束散角之内,则 N_A 为 1。 ξ 为两相邻扫描位置捕获视阈的重叠度,与星上振动幅度及捕获分辨率有关。设 θ_{AV} 为由于星上振动造成的最大角振幅, ξ 可表示为

$$\xi = \frac{\sqrt{\pi}\theta_{AV}}{2\sqrt{\Omega_r}} \quad (4)$$

系统设计应保证 $0 \leq \xi < 1$,否则捕获无法实现。求解式(1)可得

$$P_A = 1 - \exp\left(-\frac{\Omega_u}{2\pi\sigma^2}\right) \quad (5)$$

由式(3)和(4)求出 Ω_u 的表达式,代入(5)式得

$$P_A = 1 - \exp(-C_A T_A) \quad (6)$$

这样就得到了最大捕获时间与捕获概率间的关系式,其中

$$C_A = \frac{(2\sqrt{\Omega_r} - \sqrt{\pi}\theta_{AV})^2 F_A}{2\pi^2 \sigma^2 N_A} \quad (7)$$

对于特定的天线扫描捕获系统和星上环境, C_A 为常量。

3 数值仿真分析

在保证一定的捕获概率的前提下,捕获应在尽可能短的时间内完成。图 3(a)为给定不同 C_A 时, T_A 随 P_A 的变化曲线。随 C_A 的增大,在相同的捕获概率下的最大捕获时间呈指数形式减少。图 3(b)为不同 C_A 时 $\partial T_A / \partial P_A$ 随 P_A 的变化曲线,从中可较明显地看出,增大 C_A 可以改进系统的捕获性能。

为讨论方便,将 Ω_r 用对应的平面角表示,变换关系式为 $\Omega_r \approx \pi\theta_r^2/4$,式(7)可表示为

$$C_A = \frac{(\theta_r - \theta_{AV})^2 F_A}{2\pi\sigma^2 N_A} \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, C_A 分别与终端 A 位置分布均方差 σ , 星上振动角振幅 θ_{AV} , 捕获系统控制带宽 F_A 以及捕获分辨角 θ_r 等参量有关。下面对 C_A 与有关的各参量之间的变化关系进行数值分析,其中由星上实测值定出 σ 和 θ_{AV} 的取值范围⁹¹。由于捕获过程中各场次的扫描过程相同,分析中取 N_A 为 1。

图 4 为不同 θ_r 和 F_A 情况下 θ_{AV} 与 C_A 之间的变化关系曲线,其中取 $\sigma = 1$ mrad。可以看出,随着 θ_{AV} 的增加, C_A 值逐渐降低;而随着 θ_r 和 F_A 的增加, C_A 值逐渐增大,随 θ_{AV} 增加而降低的速率有所减少。其中,增加 θ_r 比增加 F_A 的效果要好。

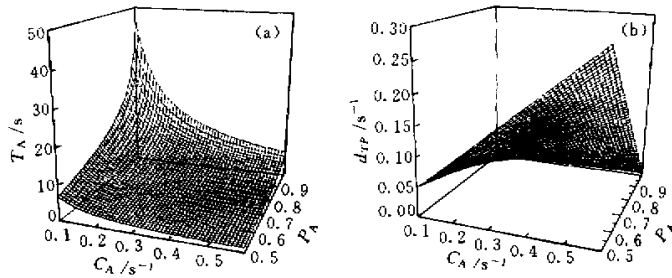


图 3 T_A, P_A 及 C_A 关系曲线
Fig.3 Curves of T_A, P_A and C_A

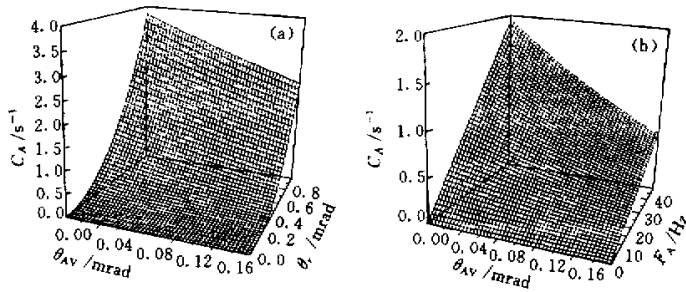


图 4 C_A 与 θ_{AV}, F_A 及 θ_r 的关系曲线
Fig.4 Curves of $\theta_{AV}, F_A, \theta_r$ vs C_A

图 5 为不同 θ_r 和 F_A 情况下 σ 与 C_A 之间的变化关系曲线,其中取 $\theta_{AV} = 0.05$ mrad。图 5 中各参量变化的总趋势与图 4 类似,但随 σ 的增加, C_A 值的下降更为明显。可见,与星上振动相比,卫星姿态与定位精度对于捕获的影响更为严重。

由图 4 和图 5 还可得出如下结论:在捕获系统的设计过程中,对于振动、卫星姿态及定位精度等因素对捕获性能的影响,可通过增大捕获分辨角和控

制系统带宽进行补偿。

4 模拟实验装置

为了进一步对捕获进行概念性研究,我们建立了一套天线扫描捕获模拟实验系统,装置框图如图 6 所示。

信号光和信标光均采用连续半导体激光器(650

nm)作为光源,功率为 5 mW,束宽约为 1 mrad。采用 10 倍开普勒型望远系统作为发射和接收共用光学天线,接收孔径为 7 cm。望远镜采用“潜望”方式安装在万向转台的下方,而不是直接由万向转台驱动,这样可以大大减少整个装置的转动惯量,有利于星载运行。采用步进电机经齿轮传动控制万向转

台,步距角为 $57 \mu\text{rad}$,方位角和俯仰角的控制范围均为 $\pm \pi \text{ rad}$ 。CCD 采用台湾敏通公司的 M1881,像素面阵 596×795 ,帧频 25 Hz。检测到的信标光信号作为角位置反馈通过图像采集卡读出并由计算机进行实时处理。设计接收光路使 CCD 的角度分辨率小于 $10 \mu\text{rad}$ 。

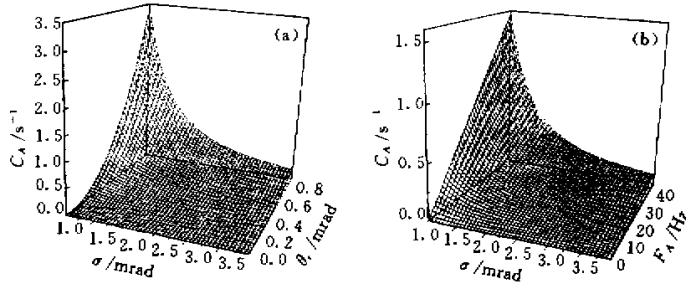


图 5 C_A 与 σ, F_A 及 θ_r 的关系曲线

Fig. 5 Curves of σ, F_A, θ_r vs C_A

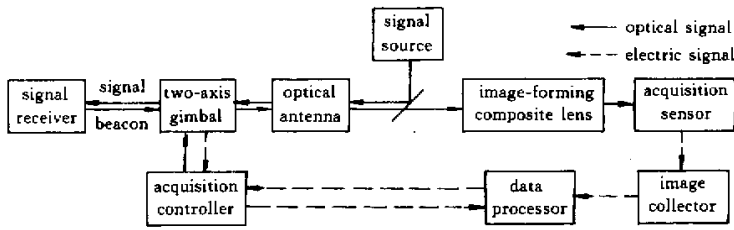


图 6 天线扫描捕获模拟实验装置框图

Fig. 6 Block of the acquisition simulation system

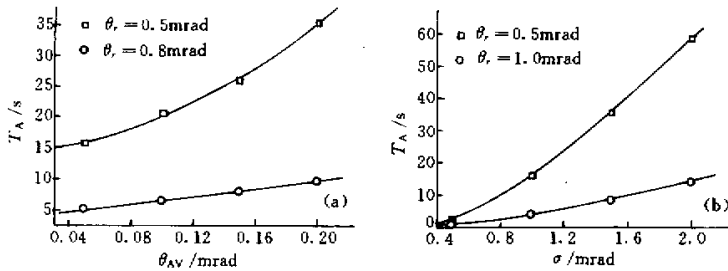


图 7 天线扫描捕获模拟实验结果

Fig. 7 Results from the simulation tests of acquisition

5 实验结果

由前面的分析可知,在激光星间链路的扫描捕获过程中,只需考虑信标光在方位和俯仰方向的角度变化,与斜距方向的变化无关。因此在实验室中可通过在光电探测器前添加衰减片来模拟实际光通

信中的长距离传输。

实验中仍取 N_A 为 1,测得扫描控制系统带宽 F_S 为 12.5 Hz。当要求捕获概率为 99% 以上时,通过调整 CCD 数据采集窗口的大小改变捕获系统的捕获分辨率,测得不同 θ_r 下各参量的关系曲线。对

不同 ξ 和 Ω_u 下天线扫描模拟实验系统的最大捕获时间进行了测试。为了同前面的数值仿真进行比较, 利用式(4)和(5)将 ξ 和 Ω_u 分别变换为 θ_{AV} 和 σ 。

图 7(a)为 θ_{AV} 与 T_A 关系曲线, 其中取 $\sigma = 1$ mrad, 图 7(b)为 σ 与 T_A 关系曲线, 其中取 $\theta_{AV} = 0.05$ mrad。图中的空心点为实验测量值, 实线为对应的二次拟合曲线。在捕获分辨率较大时, 由于对应各实验点的扫描行(列)数间隔较少, 实验点的规律不十分明显。但从整体趋势上看, 实验结果与仿真分析结果基本符合。随 θ_{AV} 和 σ 增加, 最大捕获时间逐渐增加。当增大捕获分辨率时, 这种增加的速率变小, 最大捕获时间也明显缩短, 捕获性能得到提高。

6 结 论

本文对激光星间链路中的天线扫描捕获技术进行了理论分析, 建立了天线扫描捕获理论模型, 给出了最大捕获时间和捕获概率间的关系式。数值仿真及模拟实验结果表明:

1) 在星上环境因素中, 信标光的预测角方向偏差和星上振动角振幅的增大均会造成捕获性能下降, 其中前者的影响更为严重。因此, 激光星间链路对卫星的定位精度及姿态稳定度提出了较高要求。

2) 在系统内部性能因素中, 增大捕获分辨率和捕获系统控制带宽均可提高捕获性能, 其中前者的效果优于后者。因此, 在捕获系统设计过程中应尽可能提高捕获光学系统视阈及采用大面阵捕获探测器。

3) 在一定范围内, 星上环境因素对捕获性能的影响可通过提高系统内部性能进行补偿。

激光星间链路技术的研究在我国开展时间不长, 本文对其中的天线扫描捕获技术进行了初步研究, 该项工作可为我国今后对激光星间链路的工程化研究打下一定的基础。

参 考 文 献

- 1 Robert G. Marshalek, G. Stephen Mecherle, Paul R. Jordan. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links circa 2000 [C]. *SPIE*, 1996, **2699**: 134~145
- 2 Shinhak Lee, James W. Alexander, Muthu Jeganathan. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 150~157
- 3 Caroline Racho, Angel Portillo. Characterization and design of digital pointing subsystem for optical communication demonstrator [C]. *SPIE*, 1999, **3615**: 250~262
- 4 C. C. Chen, Chester Gardner. Impact of random pointing and tracking errors on the design coherent and incoherent optical intersatellite communication links [J]. *IEEE Trans. Comm.*, 1989, **37**(3): 252~260
- 5 S. Arnon, S. Rotman, N. S. Kopeika. Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication [J]. *IEEE Aerosp. Electron.*, 1998, **34**(2): 590~596
- 6 S. Arnon, S. Rotman, N. S. Kopeika. Bandwidth maximization for satellite laser communication [J]. *IEEE Aerosp. Electron.*, 1999, **35**(2): 675~682
- 7 Michael Scheinfeld, N. S. Kopeika, Raviv Melamed. Acquisition system for microsattellites laser communication in space [C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 166~175
- 8 Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. Optical Communication [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 205~207 (in Chinese)
- 9 M. Witting, L. van Holtz, D. E. L. Tunbridge et al.. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS [C]. *SPIE*, 1990, **1218**: 205~214