

文章编号: 0258-7025(2005)02-0221-03

ATP 跟瞄精度与最佳信号光发射角的研究

荣 健¹, 胡 渝¹, 钟晓春²

(¹ 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; ² 西南交通大学应用物理系, 四川 成都 610031)

摘要 激光星间通信中捕获、跟踪、瞄准(ATP)技术是保障通信正常进行的关键一环,在完成捕获进入跟踪状态下,ATP的跟瞄精度是一个重要指标。然而,在实际系统中,ATP的跟瞄精度受到很多因素的制约,只能达到一定的精度。在这种条件下,信号光束发散角的选取对通信系统的整体性能影响很大。提出了影响光束发散角的三种因素,并进一步分析了在给定跟瞄精度的条件下,信号光束的发散角并不是越小越好而是存在一个最佳发散角,该发散角可以在满足通信系统指标的情况下,对发射端的功率需求最小。

关键词 光通信;最佳发散角;瞄准偏差;半导体激光

中图分类号 TN 929.13 **文献标识码** A

Study of ATP Accuracy and the Optimum Optical Signal Transmitting Angle

RONG Jian¹, HU Yu¹, ZHONG Xiao-chun²

(¹College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(²Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Acquisition, tracking, pointing (ATP) system is one of the key components for intersatellite laser communication. After acquiring, the accuracy of pointing and tracking is an important performance index of ATP system. Because many factors restrict, in fact, the ATP system can only attain limited precision. The optical signal beam divergence angle seriously affects the performance of intersatellite laser communication, so the choice of it for the entire system is very important. Three influencing factor of beam divergence angle are put forward and an optimum beam divergence angle based on the analysis of ATP accuracy is given out. The optimum divergence angle consumes the minimum transmitting power to satisfy indexes of communication system.

Key words optical communication; optimum beam divergence; pointing deviation; semiconductor laser

1 引 言

卫星激光通信不同于地面固定的无线光通信,卫星间激光通信的前提是卫星激光链路的建立,星间链路的建立需要经过捕获、跟踪、瞄准(Acquisition, Tracking, Pointing, ATP)来实现。在通信过程中,要始终保证通信正常进行的一个重要指标就是 ATP 的跟瞄偏差。跟瞄精度反映的是在通信过程中甲、乙两颗卫星激光链路对准的程度,ATP 系统跟瞄精度的大小反映了系统整体技术水平的高低^[1~3]。

半导体激光器是激光星间通信中应用最为广泛的器件^[4]。由于半导体激光器输出功率有限,通信距离又在几万公里以上,客观条件限制无法采用中继的方式,因此人们希望尽可能地将半导体激光器发出的通信光信号准直,以满足星间激光通信的要求。半导体激光器的准直与以下几个方面相关:1) 光学加工水平、装调工艺的限制;2) 发射天线衍射极限的限制;3) ATP 跟瞄精度的约束。

假设光学加工水平、装调工艺的水平 and 发射天线衍射极限均不会对系统产生较大的限制,ATP 的跟瞄精度成为半导体激光器准直程度的约束条件。

收稿日期:2003-10-09;收到修改稿日期:2004-11-22

基金项目:国家 863 计划资助项目。

作者简介:荣 健(1962—),男,湖北武汉人,电子科技大学教授,博士,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: rongjmail@163.com

本文给出了给定跟瞄精度条件下的最佳信号光束发散角。

2 ATP 跟瞄偏差与跟瞄精度的概念

星间激光通信的重要一步就是通过 ATP 过程,将通信链路建立起来。各种随机因素导致 ATP 的指向总是随机变化的,其指向的变化角度范围大小对通信的影响是很大的。通信系统的设计要根据 ATP 指向的变化角度范围来确定。

当 ATP 完成捕获后,跟踪、瞄准的指向偏差称为 ATP 跟瞄偏差,用 ϵ 表示,它是星间光通信发射端发射的实际光束与正对准光束的角偏差,该偏差为随机量,其概率分布函数 $F(\epsilon)$ 是高斯分布函数,跟瞄偏差的标准差 σ 的 3 倍定义为跟瞄精度,跟瞄偏差小于 3σ 的概率为 99.73%。

对于 ATP,跟瞄精度 3σ 反映了 ATP 的跟踪能力, 3σ 的值越小,ATP 的跟踪能力越高。

3 最佳信号光发射角的选择

半导体激光器的发光面积一般为 $1\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,出射角度为 $9^\circ \times 30^\circ$,而通信光束发散角最终要准直到十几个微弧度。将半导体激光器的光束发散角从几十度压缩到微弧度量级较为困难,但仍然是可以做到的。问题是在给定 ATP 跟瞄精度的情况下,是否应该最大限度地压缩准直激光光束,以达到最小的发射功率需求。

3.1 跟瞄偏差损耗

对于半导体激光器发出的激光,可近似看作高斯型场分布的激光光束,光强分布可描述为

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/W_z^2), \quad (1)$$

式中 I_0 为远场 z 处光斑中心的峰值光强, W_z 为远场 z 处高斯光束半径。它是由准直以后经发射天线出瞳(直径为 D) 激光的光束发散角 θ_i 和传输距离决定的,见图 1。

设接收机天线孔径为 D_r , $W_z \gg D_r$, 则当光束发散角为 θ_i , 跟瞄偏差为 ϵ 时,接收机接收到的光强相当于 r 处接收到的光强,与中心处接收到的光强的比值为

$$\frac{I(\epsilon, \theta_i)}{I_0} = \exp\left[-2 \frac{\epsilon^2}{(\theta_i/2)^2}\right] = \exp\left[-8 \left(\frac{\epsilon}{\theta_i}\right)^2\right], \quad (2)$$

可见,由于跟瞄偏差的存在,接收机接收到的光强降低。

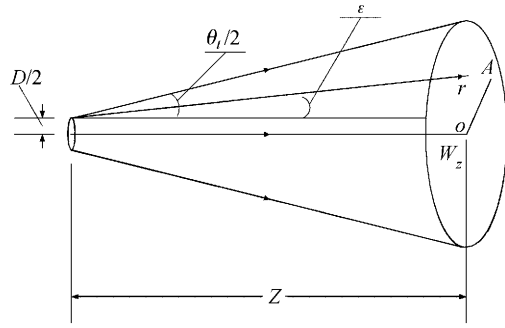


图 1 空间光通信发射、传输与接收示意图

Fig. 1 A sketch of transmitting, transferring and receiving in space optical communication

3.2 传输损耗

设空间任一点的光强度为 $I(r, z)$, 则发射天线出瞳处中心点的光强度为 $I(0, 0)$, 若发射天线孔径大小 D 近似为光腰半径的 2 倍, 即 $D \approx 2W_0$, 则其发射光功率 P_T 为

$$P_T = \int_0^{2\pi} \int_0^{W_0} I(0, 0) \exp(-2r^2/W_0^2) r dr d\theta = \frac{1}{2} (1 - e^{-2}) I(0, 0) \pi W_0^2, \quad (3)$$

在远场 z 处, 中心点的光强度为 $I(0, z)$, 光束半径为 W_z , 则总功率 P_z 为

$$P_z = \int_0^{2\pi} \int_0^{W_z} I(0, z) \exp(-2r^2/W_z^2) r dr d\theta = \frac{1}{2} (1 - e^{-2}) I(0, z) \pi W_z^2, \quad (4)$$

若不存在传输损耗, 由能量守恒, 则 P_T 应等于 P_z , 比较式(3), (4) 可得

$$I(0, z) = I(0, 0) W_0^2 / W_z^2, \quad (5)$$

接收机的天线孔径 D_r , $W_z \gg D_r$, 则在 z 处距离中心点为 r 点接收到的光功率为

$$P_r(r, W_z, z) = I(0, z) \exp(-2r^2/W_z^2) \pi (D_r/2)^2 = I(0, 0) (W_0^2/W_z^2) \exp(-2r^2/W_z^2) \pi (D_r/2)^2, \quad (6)$$

考虑发射天线效率 η_T 和接收天线效率 η_r , 光束发散角为 θ_i , 跟瞄偏差为 ϵ 时, 在 z 处接收机接收到的光功率为

$$P_r(\epsilon, \theta_i, z) = \eta_T \eta_r I(0, 0) W_0^2 \exp(-8\epsilon^2/\theta_i^2) \pi \left(\frac{D_r}{2\theta_i}\right)^2, \quad (7)$$

可见当 P_T, η_T, η_r, D_r 给定时, 在远场 z 处接收机接收到的光功率 P_r 是光束发散角 θ_i 和跟瞄偏差 ϵ 的函数。

3.3 最佳信号光发射角的选择

对于给定的跟瞄偏差 ϵ^* , 由式(7) 可得远场 z 处接收端接收到的光功率应为

$$P_r(\theta_i) = \eta_r \eta_t I(0,0) W_0^2 \pi \left(\frac{D_r}{z\theta_i}\right)^2 \exp\left[-8\left(\frac{\epsilon^*}{\theta_i}\right)^2\right], \quad (8)$$

式(8)对 θ_i 求极值:当 $\theta_i = 2\sqrt{2}\epsilon^*$ 时,接收端接收到的光功率为极大值。图2给出了归一化接收到的光功率与光束发散角/跟瞄偏差比(θ_i/ϵ^*)的关系。

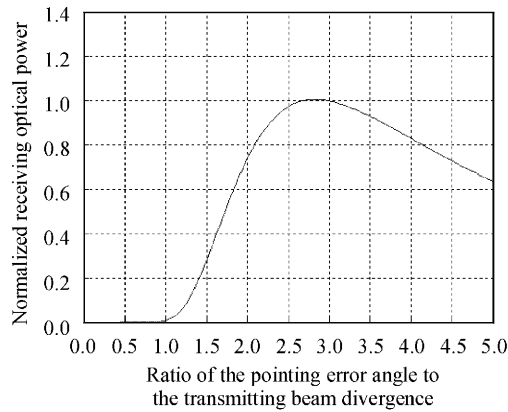


图2 最佳光束发散角的选择

Fig. 2 Choice of the optimum beam divergence angle

由图2可见,跟瞄偏差 ϵ^* 对应的接收端接收到的光功率与光束发散角有关,存在着一个极限值,若ATP系统的跟瞄精度为 3σ ,并取跟瞄偏差为 $\epsilon^* = 3\sigma$,该极限值对应于给定跟瞄精度条件下的最佳光束发散角, $\theta_i = 2\sqrt{2} \cdot 3\sigma$ 。

4 实例分析

欧空局(ESA—European Space Agency)先后研制了以不同星间链路为背景的一系列卫星激光通信终端,如SILEX和SOUT。SILEX系统的一个终端装于欧空局的中继卫星ARTEMIS,另一个终端装于法国地球观测卫星SPOT-4。2001年11月21日顺利建立了激光通信链路,实现了50 Mbit/s速率的激光通信试验。这是世界上进行的首次星间激光链路试验,是卫星激光通信领域一项里程碑式的进展。SILEX系统的参数如表1^[5]。

对应于250 mm的发射天线,其衍射极限角为7.808 μrad ,根据前面的讨论,跟瞄精度为1.5 μrad 的ATP系统,最佳发散角应为4.25 μrad 。由于衍射极限的限制,SILEX系统将光束准直到8 μrad 。假设通信系统的跟瞄精度为5 μrad ,这时衍射极限

表1 SILEX系统参数

Table 1 Major parameters of SILEX system

Link	GEO-LEO
Satellite platform	ARTEMIS-SPOT4
Transmitting power /mW	120
Modulation	IM/DD
Wavelength /nm	801~847
Bit-rate /(Mbit/s)	50
Bit error rate	10^{-6}
Transmitting antenna diameter /mm	250
Signal beam divergence / μrad	8
Distance /km	45000
Pointing error angle (3σ) / μrad	<1.5

已经不是限制信号光光束发散角的因素,通信子系统发散角的选取受到跟瞄精度的约束,为14.5 μrad 。

5 结 论

说明了在给定ATP跟瞄精度的条件下,为了尽可能地减少发射端的功率,信号光束的发散角并不是越小越好。存在一个最佳发散角,当该角度大于光学加工水平、装调工艺和发射天线衍射极限对准直角度的限制时,系统设计时准直的程度应该选取该发散角。反之,应尽可能采取一切方法使信号光束的发散角准直到系统的衍射极限,以最大程度地减少对发射端的激光发射功率的需求。

参 考 文 献

- 1 J. D. Barry, G. S. Mecherle. Communication channel burst errors induced by Gaussian distributed mispointing [C]. *SPIE*, 1986, **616**:137~140
- 2 J. D. Barry, G. S. Mecherle. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite borne, free-space optical communication systems [J]. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(6):1049~1054
- 3 Morio Toyoshima, Takashi Jono, Keizo Nakagawa *et al.*. Optimum intersatellite link design in the presence of random pointing jitter for free-space laser communication systems [C]. *SPIE*, 2002, **4635**:95~102
- 4 Rong Jian, Hu Yu. Key technology and schemes of optical communication between GEO and LEO [J]. *J. Southwest Jiaotong University*, 2003, **38**(2):220~222
荣 健,胡 渝. 空间卫星光通信链路关键技术与方案的研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2003, **38**(2):220~222
- 5 Toni Tolker Nielsen. Pointing, acquisition, and tracking system for the free-space laser communication system SILEX [C]. *SPIE*, 1995, **2381**:194~205