

光通信中光束瞄准的误差分析^{*}

张秉华^{**}

熊金涛 胡 渝

(中国科学院光电研究所 成都 610041) (电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 对自由空间光通信中光束瞄准的误差进行了分析, 并对典型的 ATP 系统及其关键技术作了论述。

关键词 光通信; 误差分析; 捕获; 跟踪; 瞄准

中图分类号 TN929.12; TP202.2

从 1980 年以来, 自由空间激光通信技术受到越来越多的重视, 尤其是在低地球轨道卫星 (LEO) 和地球同步轨道卫星 (GEO) 之间的激光通信。这是由于激光通信具有发射体积小、功耗少和高数据率三个主要优点, 是一般的微波通信所不及的。由于光波的波长比微波波长短得多, 所以可以用相当小孔径的天线来获得特别高的天线增益。

不过, 特别高的光学天线增益要求光束特别窄, 这样虽然光通信传播不容易受到干扰和拦截, 却要求极精密的瞄准技术以便使这样的光束瞄准。在自由空间激光通信系统中, 激光光束束宽在 $10 \sim 20 \mu\text{rad}$ 量级, 由此要求瞄准精度在 $1 \sim 2 \mu\text{rad}$ 量级, 并且在通信期间, 通过卫星之间的相互跟踪一直保持瞄准精度。因此, ATP 技术是实现卫星之间激光通信的关键技术之一。

本文描述瞄准误差如何作为自由空间激光通信的一个重要设计参数, 如何选择 ATP 系统的结构以满足对它的极高瞄准精度的指标要求和 ATP 系统的关键技术。

1 瞄准误差是自由空间激光通信系统的一个重要设计参数

光通信系统在设计时, 首先要确定使通信闭合和达到所希望的位误差率所需要的光束束宽 α , 然后选择和设计合适的光机结构和 ATP 结构使瞄准误差减小到只占光束束宽的一小部分。瞄准误差的性质可用径向角度瞄准偏差 e 或用瞄准偏差概率分布 $P(e)$ 的 rms 标准偏差 σ 来描述。

假定瞄准误差 e 是高斯分布的, 而且假定它的 rms 标准偏差 σ_x 和 σ_y 是径对称的, 因此, $\sigma = \sigma_x = \sigma_y$, 和 $e = (e_x^2 + e_y^2)^{\frac{1}{2}}$ 。有整定公式

$$\int_0^{\infty} P(e) de = 1 \quad (1)$$

径向概率分布, 可认为是瑞利分布

$$\text{gh} \quad P(e) = \frac{e}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式 (2) 表示 e 和 σ 之间的关系。

突发误差的概率作为光学通信系统的一个性能指标, 由下式给出

1998 年 7 月 4 日收稿

* 国防科工委预研基金资助项目

** 男 60 岁 大学 研究员

$$P_E^* = \int_{e^*}^{\infty} P(e) d\epsilon \quad (3)$$

这里, $e = e^*$ 代表在光学通信系统误差分配中假定允许的瞄准误差上限。当动态瞄准误差超过 $e = e^*$ 值时便产生突发误差。

对式 (3) 求解给出

$$e^* = \sqrt{2(-\ln P_E^*)} \sigma \quad (4)$$

从使接收器上获得发射的激光功率为最大的优化角度出发, 得到 e^* 和光束束宽 α 的最佳比值为

$$\frac{\alpha}{e^*} = 4.16 \quad (5)$$

或者

$$\frac{e^*}{\alpha} = 0.24 \quad (5a)$$

将式 (4) 代入式 (5) 得

$$\frac{\alpha}{\sigma} = \frac{\sqrt{-\ln P_E^*}}{0.17} \quad (6)$$

由式 (6) 可见: 光学通信系统的发射激光光束束宽 α 与 rms 标准瞄准偏差 σ 的最佳比值和突发误差概率有关。例如, 当 $\sigma = 1 \mu\text{rad}$ 时, 如果 $P_E^* = 1 \times 10^{-3}$, 将要求 $\alpha = 15.4 \mu\text{rad}$; 当 $\sigma = 1 \mu\text{rad}$ 时, 如果 $P_E^* = 1 \times 10^{-6}$, 将要求 $\alpha = 22.1 \mu\text{rad}$ 。

突发误差概率对光学通信系统的误码率或信息丢失率有直接的关系。例如, $P_E^* = 1 \times 10^{-3}$ 就意味着一个初始有位误差概率。例如, $P_E^* = 1 \times 10^{-6}$ 构成的系统, 由于突发误差的原因, 它只能在 0.999 的有效时间保证 $P_E = 1 \times 10^{-6}$, 而在 0.1% 的通信时间内 P_E 将会比 1×10^{-6} 结果更坏。例如, 典型的卫星通信通道具有数据率 100 Mbps, 如果突发误差概率 $P_E^* = 1 \times 10^{-3}$, 即意味着有 0.001 s 时间瞄准误差可能超出允许值, 将造成最坏情况下会丢失 0.1 Mbit 数据。

假定是理想的衍射光学系统, 衍射图形的第一个暗环的 Airy 斑束宽 α 由下式给出

$$\alpha = \frac{2.44 \lambda}{D} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 得

$$D \approx \frac{\lambda}{2.41 \sigma \sqrt{-\ln P_E^*}} \quad (8)$$

它给出在给定光学波长 λ 、瞄准标准偏差 σ 和突发误差概率 P_E^* 条件下使在接收器上获得功率为最大时的发射望远镜最佳直径 D 。

表 I 给出在 $\sigma = 1 \mu\text{rad}$, $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$ 时, 在 $(1 - P_E^*) \cdot 100\%$ 系统有效时间内, 工作在希望的位误差概率的系统要求。

表 1 位误差概率的系统要求

P_E^*	系统有效率	α/σ	D/cm	相对于 $P_E^* = 1 \times 10^{-2}$ 为保持信息恢复所需增加激光功率
1×10^{-2}	0.99	12.5	16.2	0.0
1×10^{-3}	0.999	15.4	13.2	1.8
1×10^{-4}	0.9999	17.9	11.3	3.1
1×10^{-5}	0.99999	20.0	10.1	4.1
1×10^{-6}	0.999999	22.1	9.2	4.9

由上述分析可见：瞄准误差是直接和光通信系统的性能、束宽和光学天线发射口径有关的一个重要设计参数。在相当程度上，瞄准精度将决定整个光通信系统的复杂性、尺寸、重量和所能达到的性能水平。

2 自由空间激光通信的典型 ATP 系统结构和关键技术

自由空间激光通信的 ATP 系统具有如下的一些主要特点：1) 极高的瞄准精度和跟踪精度，优于 2^μrad 量级； 2) 高的伺服带宽：400 ~ 1 000 Hz； 3) 对宿主卫星扰动具有高的抑制能力。

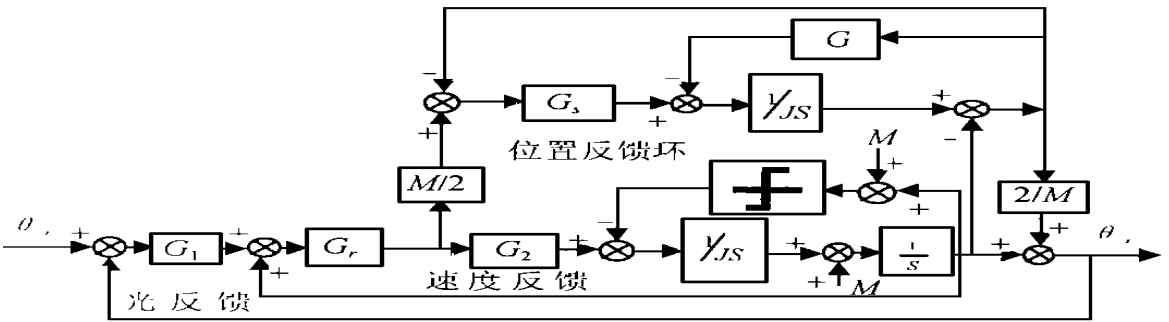


图 1 ATP 系统结构框图

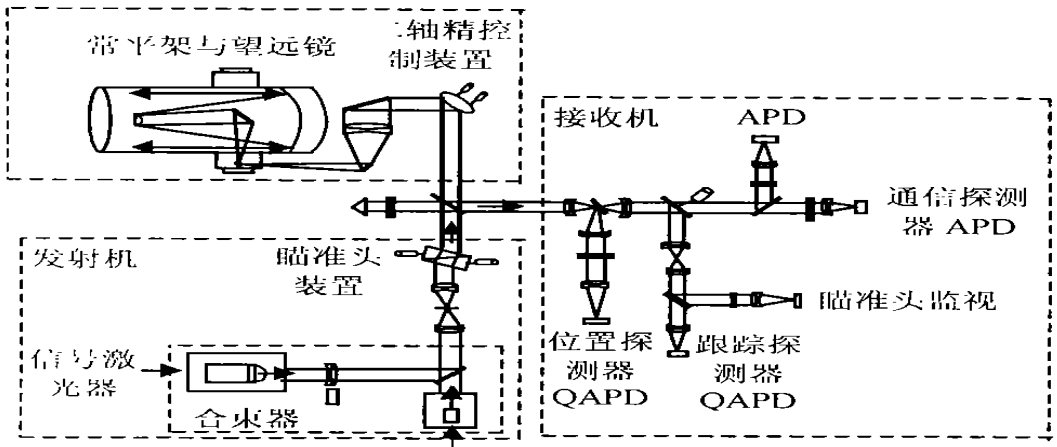


图 2 卫星光通信光学系统图

根据上述特点，ATP 系统结构如图 1 所示。它采用复合轴 (Combined axis) 的控制系统结构，由两个 II 型伺服回路分别控制光束在方位和俯仰方向的瞄准和跟踪。粗跟踪回路具有低的伺服带宽 (1 Hz)，大的动态范围，用来控制常平架 (GTA) 系统的角运动；精跟踪回路具有高的伺服带宽 (400 Hz)，窄的动态范围，用来控制光路中两维定向反射镜的精密瞄准/跟踪，它可以进一步校正粗跟踪陀螺仪稳定回路中未能补偿的高频基座运动扰动，进一步改善光束视线

(LOS) 瞄准和稳定精度。这种两个 II 型伺服回路构成的复合轴伺服系统相当于一个 IV 型伺服跟瞄系统, 具有高精度、高带宽和主动的抑制扰动的能力。这种典型 ATP 系统对应的光通信光学系统如图 2 所示。此外, 为了补偿两个卫星端机之间的相对切向速度和光束往返传播时延造成的瞄准误差分量, 在发射机光路中还有超前角补偿控制机构。

自由空间激光通信的 ATP 系统的关键技术有: 1) 宽带高精度两轴光束定向跟踪瞄准伺服技术; 2) 具有陀螺惯性稳定回路的跟踪瞄准伺服技术; 3) 多伺服回路的复合(嵌套)技术。

3 结束语

本文给出的光通信中光束的瞄准误差分析可用于光通信系统光学天线和 ATP 系统的设计参考。给出的典型 ATP 系统结构和关键技术, 可用作今后进一步研究的考虑。

参 考 文 献

- 1 Barry J D. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication Systems. *optical Engineering*, 1985, 27: 325~333
- 2 Held K J, Barry J D. Precision optical pointing and tracking from spacecraft with vibrational noise. *SPIE*, 1986, 618: 160~173

Error Analysis of Laser Beam Pointing in Free Space Optical Communication

Zhang Binghua

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041)

Xiong Jintao Hu Yu

(Institute of Applied Physics, UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract This paper describes error analysis of laser beam pointing in free-space optical communication. A typical ATP system and its key techniques, is also presented

Key words optical communication; error analysis; acquisition; tracking; pointing.