

文章编号 1004-924X(2006)01-0016-06

深空光通信中光束瞄准技术研究

徐科华, 马 晶, 谭立英

(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)

摘要:研究了深空光通信中的光束精确瞄准技术。从航天器和天体的运动规律出发,建立了一种基于航天器和地球星历表的深空光通信的瞄准理论,导出了瞄准矢量在航天器星上坐标系中角度,角速度,角加速度的变化规律,对两终端的相对运动进行分析,导出提前瞄准角和接收光波长多普勒频移的变化规律,进行了计算机仿真。结果表明,瞄准角度、角速度、角加速度、提前瞄准角呈现出周期性变化,在当前的技术水平下,在深空距离下能够实现光束的精确对准。接收光波长的多普勒频移也呈现周期性变化,其大小在 0.07 nm 以内,决定了深空光通信中窄带滤光片的带宽应在 0.7 nm 以上,也表明在深空光通信中,采用相干探测方法将面临严重挑战。

关键词:深空光通信;光束瞄准;提前瞄准角;多普勒频移

中图分类号:TH929.13 **文献标识码:**A

Research on beam pointing in deep space optical communication

XU Ke-hua, MA Jing, TAN Li-ying

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

Abstract: In order to achieve the accurate pointing of beam in deep space optical communication, according to the movement rule of aircraft and celestial body, the pointing theory for deep space optical communication was set up based on the ephemeris of aircraft and the earth, the variety of pointing angle, angle velocity, and angle acceleration was educed. The relative mutation of two terminals that was used to set the deep space optical link was analyzed, and the variety of ahead pointing angle and Doppler frequency shift was educed. A computer simulation was performed, the result shows that the pointing angle, angle velocity and angle acceleration are periodical, the accurate pointing is practicable depend on the technology of China nowadays. The Doppler frequency shift of optical signaling is also periodical, its swing is 0.07 nm, which decides that the bandwidth of optical-filter should be high than 0.7 nm. The results also show that correlation detection will face serious challenge in deep space optical communication.

Key words: deep space optical communication; beam pointing; ahead pointing angle; Doppler frequency shift

1 引言

相对于微波通信系统,用激光进行空间信息的传输具有体积小,质量轻,功耗小的优势,因此目前已得到世界各国的广泛重视。用激光进行空间通信,尤其是用激光进行深空探测科学数据的回传,需要保持两通信终端精确的对准及跟踪,是光通信链路成功建立和保持的关键。

目前世界上很多国家都在对深空光通信中的光束的瞄准技术进行研究,其中最典型的当属美国航空航天局属下的喷气推进实验室(JPL),JPL针对太阳系内行星的探测设计了一套深空光通信演示系统模型,该系统利用地球及航天器的星历表结合航天器的姿态来进行光束的瞄准^[1-2]。该方案后来成为各国进行深空光通信光束瞄准技术研究的基础。

由于我国尚缺乏发射航天器对月球及以外太空探测的实践,因此对深空光通信光束瞄准技术的研究只能在现有的技术基础上进行初步探索。本文从航天器和天体的轨道运动出发,不考虑其星历表误差,对光束的瞄准理论进行了分析,在瞄准理论建立过程中,参考了国内关于激光测距系统和导弹控制系统的校准原理和方法^[3-4]。

在深空光通信链路建立过程中,需要在航天器星上坐标系中确定链路的瞄准矢量,瞄准矢量可通过航天器上存储的自身星历表及地球星历表来确定,然后通过跟瞄控制系统控制光学天线瞄准地面接收端方向。由于建立光通信链路的两个终端的相对运动及光束单程传输延迟时间和星上系统的信号处理时间的影响,需要进行提前瞄准对两终端的相对运动进行补偿,本文对光束的瞄准理论进行了具体分析。

2 瞄准理论分析

对深空光通信的瞄准理论进行分析,需要选定一个合适惯性参考坐标系。当前的深空探测任务主要面对太阳系内的天体,而描述太阳系内天体的运动通常选用日心黄道坐标系,同时,对某些深空探测器的轨道描述也选用日心黄道坐标系。基于以上原则,选用了日心黄道坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 作为惯性坐标系,该坐标系原点位于日心

O_s ,其基准面为黄道平面,其 X_s 方向为 J2000 年春分点日心到地心的连线方向, Z_s 轴方向与地球公转角速度矢量一致。 X_s, Y_s, Z_s 成右手螺旋。

航天器在惯性坐标系中的位置可由其星历表确定,设某时刻其位置矢量为 r_1 ,地面接收端在惯性坐标系中的位置可由地球星历表及其在地心赤道坐标系中的位置来确定,该时刻地面站在惯性坐标系中的位置矢量表示为 r_2 ,光束瞄准矢量可表示为

$$r = r_2 - r_1, \quad (1)$$

跟瞄过程中主要考虑光束的方向,对光束方向的控制通常都在飞行器的星上坐标系中进行^[5]。为了简化分析,设飞行器的轨道平面与日心在同一平面内,采用星上俯仰坐标系 $O-SEZ$ 作为光束控制的基准坐标系,该坐标系原点位于飞行器的质心,其坐标平面为其轨道平面, S 轴指向日心的反方向, Z 轴与其角速度矢量一致, SEZ 成右手螺旋,如图 1 所示。

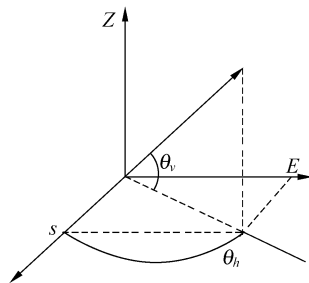


图 1 星上俯仰坐标系

Fig. 1 Pitching coordinate in aircraft

上图中, θ_h 是方位角, θ_v 是俯仰角。深空光通信跟瞄子系统在方位角和俯仰角两个方向对光

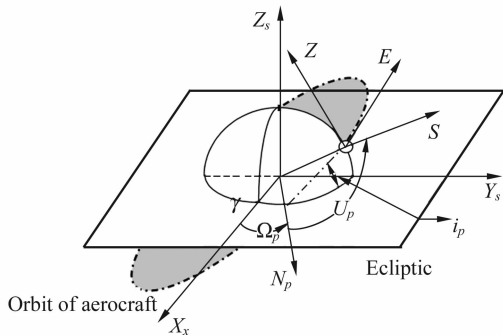


图 2 惯性坐标系和星上俯仰坐标系的位置关系

Fig. 2 Relation of inertial coordinate to pitching coordinate in aircraft

束进行控制来实现光束的瞄准。

航天器星上俯仰坐标系与惯性坐标系的位置关系如图 2 所示。

上图中 Ω_p 是航天器的升交点, U_p 是其初始角, i_p 是轨道平面相对于黄道平面的倾角, ω_p 是其角速度。把瞄准矢量变换到星上俯仰坐标系中, 可表示为

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{T}_p \mathbf{r}, \quad (2)$$

上式中 \mathbf{T}_p 是把惯性坐标系中矢量变换到星上俯仰坐标系的变换矩阵, 其表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_p &= \bar{K}(\omega_p t + \varphi_p) \times \bar{I}(i_p) \times \bar{K}(\Omega_p) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\omega_p t + \varphi_p) & \sin(\omega_p t + \varphi_p) & 0 \\ -\sin(\omega_p t + \varphi_p) & \cos(\omega_p t + \varphi_p) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i_p & \sin i_p \\ 0 & -\sin i_p & \cos i_p \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} \cos \Omega_p & \sin \Omega_p & 0 \\ -\sin \Omega_p & \cos \Omega_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

对瞄准矢量求导, 可得两终端相对运动的速度矢量

$$\mathbf{v}_p(t) = \frac{d\mathbf{r}_p(t)}{dt}, \quad (4)$$

设 i, j, k 表示星上俯仰坐标系在 S, E, Z 三个方向的单位矢量, 则瞄准矢量和两终端相对运动的速度矢量在 $O-SEZ$ 中可表示为

$$\mathbf{r}_p = r_x \cdot i + r_y \cdot j + r_z \cdot k, \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_p = v_x \cdot i + v_y \cdot j + v_z \cdot k, \quad (6)$$

由(5)式, 航天器上天线的指向为

$$\theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right), \quad (7)$$

$$\theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{r_y}{r_x} \right), \quad (8)$$

由(6)式, 航天器上天线的指向更新的角速度为

$$\omega_v = \frac{d\theta_v}{dt}, \quad (9)$$

$$\omega_h = \frac{d\theta_h}{dt}, \quad (10)$$

航天器上天线的指向更新的角加速度为

$$\beta_v = \frac{d\omega_v}{dt}, \quad (11)$$

$$\beta_h = \frac{d\omega_h}{dt} \quad (12)$$

在链路建立过程中, 由于两终端的相对运动、光束的传输时间、星载系统的信号处理时间的影响, 两终端必须进行提前瞄准。瞄准矢量为 \mathbf{r}_p , 则光束的单程传输延迟时间为

$$t_d = \frac{|\mathbf{r}_p|}{c}, \quad (13)$$

设航天器星载系统的信号处理时间为 t_s , 则时间延迟的总和为

$$t = t_d + t_s, \quad (14)$$

航天器星上俯仰坐标系中提前瞄准角为

$$\theta_{av} = \omega_v \cdot (t_d + t_s), \quad (15)$$

$$\theta_{ah} = \omega_h \cdot (t_d + t_s). \quad (16)$$

由于星上终端和地面接收终端的相对运动, 将引起下行链路接收信号光波长的漂移, 即多普勒频移, 接收信号光频率可表示为

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v \cos \theta}{c} \right), \quad (17)$$

上式中, v 为两者相对运动速度大小, θ 为相对运动的速度矢量和瞄准矢量的夹角, f_0 为信号光频率。则链路的多普勒频移可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{c}{f_0} - \frac{c}{f} = \lambda_0 \frac{v \cos \theta}{v \cos \theta + c}, \quad (18)$$

导出链路建立过程中瞄准矢量在航天器星上俯仰坐标系中角度、角速度、角加速度及提前瞄准角的变化, 就可以精确控制光学天线的指向, 实现光束的精确瞄准。

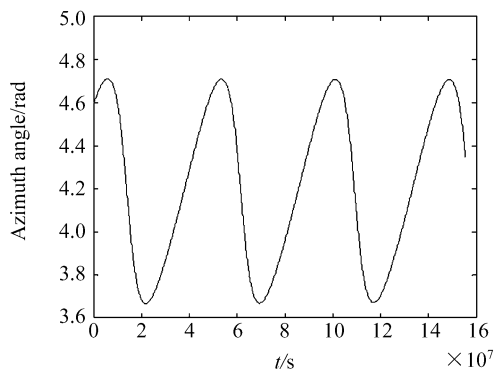
3 瞄准理论仿真

为了简化分析, 选绕太阳做圆周运动的航天器来进行瞄准理论的分析, 其轨道半径为 3×10^{11} m, 根据地球星历表和航天器的运动, 建立了仿真模型。

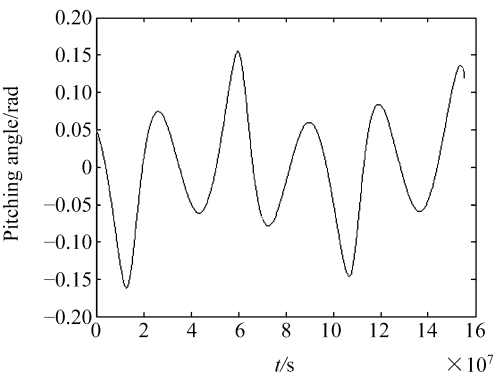
设系统的信号处理时间为 0.01 s, 仿真时间长度为 5 a, 得到的仿真结果如下。

在星上俯仰坐标系中, 瞄准矢量在方位角和俯仰角两个方向的变化如图 3 所示。

从图 3 可知, 链路方位角和俯仰角的变化呈现明显的周期性, 方位角的变化幅度为 1.044 rad, 最大值为 4.711 rad, 最小值为 3.667 rad。俯仰角的变化幅度为 0.3175 rad, 其最大值为 0.1552 rad, 最小值为 -0.1623 rad。



(a)链路方位角的变化
(a)Variety of azimuth angle

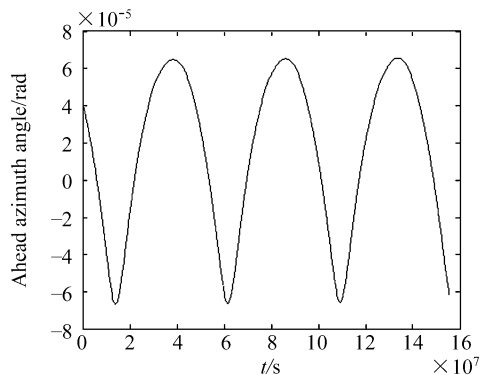


(b)链路俯仰角的变化
(b)Variety of pitching angle

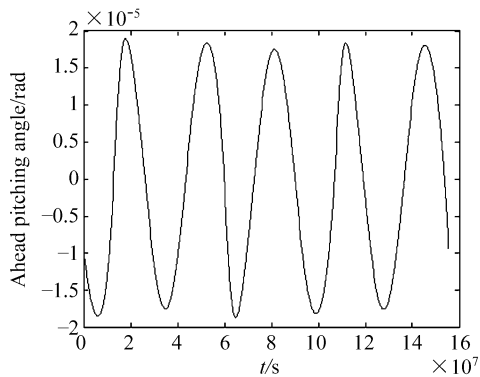
图 3 激光链路在星上俯仰坐标系中角度的变化
Fig. 3 Angle variety of laser link in pitching coordinate in aircraft

星上俯仰坐标系中提前瞄准角的变化如图 4 所示。

图 4 表明,星上俯仰坐标系中,提前瞄准角的变化呈现明显的周期性。方位提前瞄准角变化范



(a)方位提前瞄准角的变化
(a)Variety of ahead azimuth



(b)俯仰提前瞄准角的变化
(b)Variety of ahead pitching

图 4 激光链路在星上仰坐标系中提前瞄准角的变化

Fig. 4 Ahead angle variety of laser link in pitching coordinate in aircraft

围为 1.328×10^{-4} rad,最大值为 6.593×10^{-5} rad,最小值为 -6.687×10^{-5} rad。俯仰提前瞄准角的变化范围为 3.773×10^{-5} rad,其最大值为 1.898×10^{-5} rad,最小值为 -1.876×10^{-5} rad。

星上俯仰坐标系中瞄准矢量在方位角和俯仰角两个方向角速度的变化如图 5 所示。

图 5 表明,星上俯仰坐标系中,瞄准角速度的变化呈现明显的周期性。方位角速度变化范围为 1.747×10^{-7} rad/s,最大值为 4.413×10^{-8} rad/s,最小值为 -1.306×10^{-7} rad/s。俯仰角速度的变化范围为 6.716×10^{-8} rad/s,其最大值为 3.402×10^{-8} rad/s,最小值为 -3.314×10^{-8} rad/s。

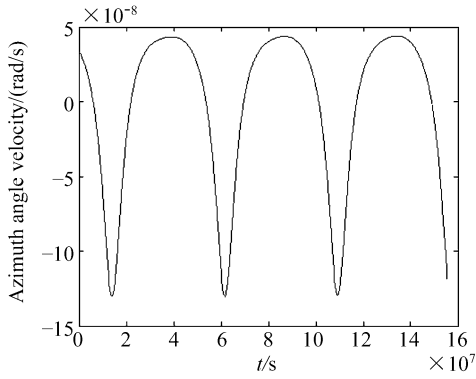
星上俯仰坐标系中瞄准矢量角加速度的变化如图 6 所示。

图 6 表明,星上俯仰坐标系中,瞄准角加速度的变化呈现明显的周期性。方位角加速度变化范围为 4.614×10^{-14} rad/s²,最大值为 2.324×10^{-14} rad/s²,最小值为 -2.290×10^{-14} rad/s²。俯仰角加速度的变化范围为 2.335×10^{-14} rad/s²,其最大值为 1.191×10^{-14} rad/s²,最小值为 -1.144×10^{-14} rad/s²。

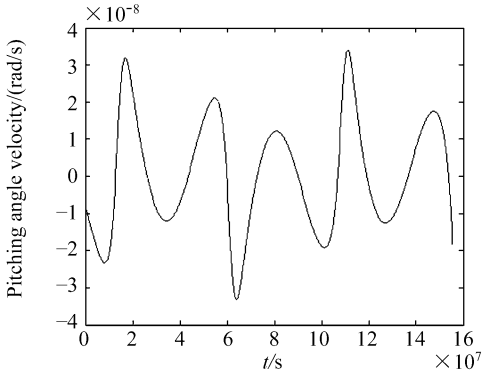
接收信号光波长的多普勒频移如图 7 所示。

图 7 表明,当采用波长为 1 064 nm 的激光作

为下行信号光束,链路的多普勒频移变化呈现明显的周期性,其变化范围为 ± 0.07 nm。

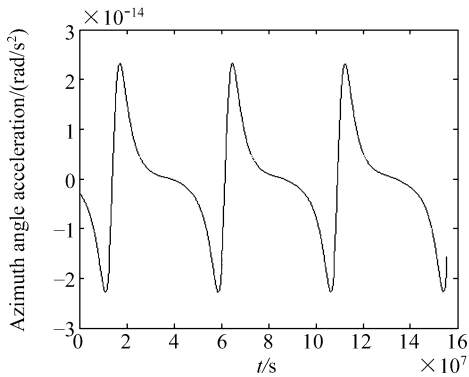


(a)方位角速度的变化
(a) Variety of azimuth velocity

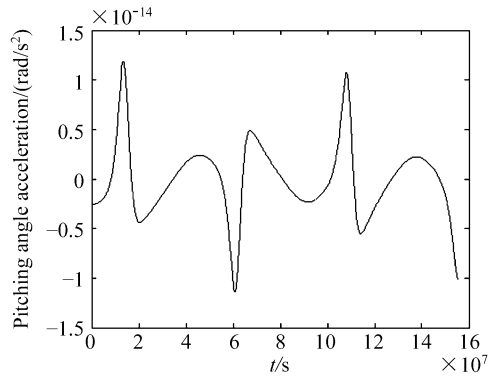


(b)俯仰角速度的变化
(b) Variety of pitching velocity

图 5 激光链路在星上俯仰坐标系中角速度的变化
Fig. 5 Angle velocity variety of laser link in pitching coordinate in aircraft



(a)方位角加速度的变化
(a) Variety of azimuth acceleration



(b)俯仰角加速度的变化
(b) Variety of pitching acceleration

图 6 激光链路在星上俯仰坐标系中角加速度的变化

Fig. 6 Angle acceleration variety of laser link in pitching coordinate in aircraft

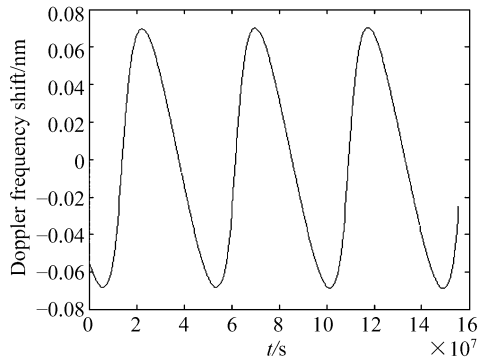


图 7 接收光的多普勒频移

Fig. 7 Doppler frequency shift of received optical signals

4 结 论

理论分析和仿真结果都表明,在深空激光通信链路建立过程中,瞄准矢量在星上俯仰坐标系中方位角、俯仰角、方位角速度、俯仰角速度、方位角加速度、俯仰角加速度的变化都呈现出明显的周期性,这是由航天器和地球的运动规律决定的。其中角速度的变化量级在 10^{-7} rad/s 附近,角加速度的变化量级在 10^{-14} rad/s² 附近,这为精确地控制光束的瞄准提供了依据。在当前的技术水平下,在深空距离下设计满足该条件的控制系统是可以实现的,同时也为深空光通信系统的设计

提供了参考,在跟瞄系统满足以上条件时,可以综合考虑尽可能地使深空光通信链路的性能达到最优。同时,瞄准过程中需要对两终端的相对运动进行补偿,推导出了提前瞄准角的表达式,并进行了仿真,结果表明提前瞄准角也呈现出周期性变化,其大小在 10^{-5} rad 量级。两终端的相对运动将引起接收光波长的漂移,即链路的多普勒频移,当采用的激光器波长为 1 064 nm 时,其大小在 0.07 nm 以内。在深空光通信链路建立和运行过程中,常采用来抑制背景光,由于链路的多普勒频

移,则滤光片的带宽应为漂移波长的 5~10 倍,即在深空光通信过程中,使用的窄带滤光片带宽应在 0.7 nm 以上,而带宽过宽的窄带滤光片将使背景光的抑制性能变差,因此,在设计整个系统的时候需要综合考虑。同时,光电探测器通常只对某一波段的光波最敏感,因此多普勒频移还将引起信号接收变差。同时,多普勒频移也使得在设计深空光通信系统时,使用相干探测方法进行信号检测面临严重挑战。

参考文献:

- [1] ALEXANDER J W, LEE S, CHEN C. Pointing and tracking concepts for deep-space missions[J]. *SPIE*, 1999, 3615: 230-249.
- [2] LEE S, ALEANDER W, ORTIZ G G. Sub-microradian pointing system design for deep-space optical communications[J]. *SPIE*, 2001, 4272: 104-111.
- [3] 张维, 周冰, 沈学举. 精确校正激光测距仪三光轴平行的理论计算方法研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (6): 650-654.
ZHANG CH, ZHOU B, SHEN X J, *at al.* Study of the calculation method for accurately adjusting laser-rangefinder's three-optics-axis to parallel to each other[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (6): 650-654. (in Chinese)
- [4] 王悦勇, 郭喜庆, 武克用. 国外弹道式导弹方位瞄准技术及其发展[J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (1): 31-35.
WANG Y Y, GUO X Q, WU K Y. Development trend of azimuth aiming system of basic missiles abroad[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (1): 31-35. (in Chinese)
- [5] 于思源, 马晶, 谭立英. 提高卫星光通信扫描捕获概率方法研究[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(1): 57-62.
YU S Y, MA J, TAN L Y. Methods of improving acquisition probability of scanning in intersatellite optical communications[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(1): 57-62. (in Chinese)

作者简介:徐科华(1979—),男,邵东人,哈尔滨工业大学物理电子学博士研究生,主要研究方向为自由空间光通信和光学信息处理。E-mail: xukehua2001@163.com