

基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究

郑 阳 付跃刚 胡 源 姜会林

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 空间激光通信全光链路组网具有较高的通信速率,决定了其在未来全球空间通信领域中的重要地位及发展方向。全光链路组网需解决一点对多点的光学链路问题,不同方法所涉及的结构和跟踪控制方式会有较大差异。基于全光链路组网光学原理,提出了一种轨面四反射镜光学天线结构。基于链路组网方案的光学动态跟踪原理进行数学建模,给出链路通信节点间动态对准时光学参量间的关系,并对数据进行分析,可用于空间激光通信终端捕获、跟踪、瞄准(ATP)控制系统。提出了一种低轨双链路列队卫星组网方案,将激光通信终端光学天线四跟踪平面反射镜的工作面置于卫星轨道平面链路节点处,可实现低轨全光链路空间激光通信组网。

关键词 光通信; 链路组网; 光学天线; 跟踪; 自由空间

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105001

Research on Four-Mirror Dynamic Alignment Based on Space Laser Communication Link Networks

Zheng Yang Fu Yuegang Hu Yuan Jiang Huilin

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract All optical link networks of the space laser communication with high transmission rate determine their development position and direction in global space communication in the future. All optical link networks require to solve the problem of the one-point to multi-points optical link. Different ways to solve the problem require different optical antenna structures and different tracking control ways. Based on the optical principle of all optical link networks, a flat four-mirror optical antenna structure is proposed. The mathematical model is established based on the dynamic tracking principle of link network scheme. The mathematical relationship is given based on the optical parameters of communication nodes, and data are analyzed. It can be used as the guidance for space laser communication terminal ATP (acquisition, tracking, pointing) control system. A networking scheme of low earth orbit double links is proposed, the working plane of laser communication terminal four plane tracking mirrors optical antenna is placed at the satellite link orbit plane, and all optical link networks with space laser communication in low earth orbit can be realized.

Key words optical communications; link networks; optical antenna; tracking; free space

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.4251; 060.4254; 060.4263

1 引 言

空间激光通信以光波作为信息传递的载体,相比于技术成熟的微波通信系统,具有通信频带宽、信息容量大、轻小型、功耗低及抗干扰等优点,是一种极具潜力的通信技术手段^[1-3]。未来若能实现空间

激光通信全光链路组网,对全球高速率信息传递将是一次具有里程碑意义的突破。目前空间激光通信全光链路组网尚处于理论研究阶段^[4-5],但近 20 年空间激光通信点对点在轨实验的成功^[6],为实现全光链路组网提供了有力的实践基础。从应用角度考

收稿日期: 2013-05-10; **收到修改稿日期**: 2013-08-01

基金项目: 总装备部 921 预研(20130102)

作者简介: 郑 阳(1987—),男,博士研究生,主要从事空间相干激光通信方面的研究。E-mail: 747421565@qq.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。E-mail: hljiang@cust.edu.cn

考虑,空间激光通信只有实现多点互通组成空间网络^[7-9]才具有实用价值。空间激光通信组网的必要条件是实现一点对多点通信,同时具备动中通、双工通等要求。组网链路节点处实现一点对多点通信功能的光学系统有多种方案可实施,概括为如下两类:一类利用同一个卡式系统通过增加一个多光路分光头实现;一类利用多个卡式系统捆绑而成。第二类利用多个卡式系统虽然在技术方面相对第一类较为成熟,但在体积和重量方面显然不占优势。第一类中的多光路分光头又可演化成多种形式,如非球面多点对准方式和多镜拼接扫描方式^[10]等。基于空间激光通信的光学系统,要求结构紧凑、扫描跟踪角度大,这有利于多点光学天线一体化设计。本文提出了一种适用于低轨全光链路组网的具体光学天线结构方案,并对其进行了动态光学分析研究。

2 低轨链路组网及节点处光学天线方案

在地球同步轨道处平均布置三个激光通信终端,即可实现全球链路组网通信。但目前地球同步轨道已基本布满各国的卫星,可用空间很少^[11-12],且位于同步轨道的激光通信终端所需的光学天线口径、体积和重量都较大。激光通信终端之间的距离都在4万公里(1公里=1000米)以上,使捕获、跟踪、瞄准(ATP)控制难度较大。缩短链路通信距离可使光学系统口径大为减少,并且链路通信距离的减少对ATP控制精度的要求也有所降低。基于目前现状,提出一种可用于低轨链路全光组网方案(如图1所示),赤道面 M_0 内距地面高度 H 置 N_1 颗卫星激光通信终端,平均布置纵队互联,可用于全球干路组网。低轨距地面高度 h 置 N_2 颗卫星激光通信终端用于地区间互联。以中国地理特征为例,可选低轨面与赤道面倾角为 A 度,升交点赤经 B 度的轨道,即可实现单颗卫星上的激光通信终端覆盖中国

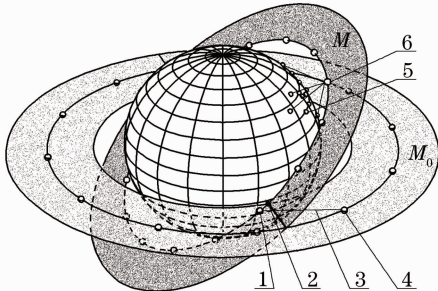


图1 低轨链路组网方案

Fig. 1 Low earth orbit link network scheme

主要地理特征点的信息收发。低轨链路在升交点2(如图1所示)附近与链路干线进行动态对准及数据交换。图1中标号1和4分别代表位于轨道面 M 和 M_0 内的通信卫星,标号3代表通信卫星之间利用激光进行链路连接,标号5代表地面站观测点,标号6代表与地面站进行信息交换的通信卫星。

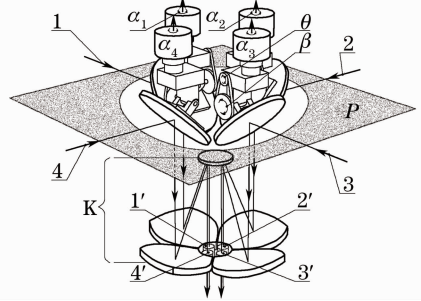


图2 四反射镜光学天线

Fig. 2 Four-mirror optical antenna

相对同步轨道十分之一的通信距离,使ATP控制难度大幅降低,光学口径大为缩小。可采用平面四反射镜动态光学天线结构方案(如图2所示),用于动态跟踪对准的光学天线头为4块平面反射镜,初始状态下4块平面反射镜光轴指向位于平面 P 内的1、2、3、4且互成 90° 角, P 面为与其对接的卡式系统 K 的光轴法面。应用时 P 面应与卫星轨道平面重合。四跟踪反射镜的光轴指向由4个驱动机构分别控制,四跟踪反射镜在 P 面内的跟踪角度由伺服控制系统驱动转角 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 来完成。四跟踪反射镜相对于 P 面的俯仰跟踪角 θ 由驱动电机控制俯仰 β 角来完成。根据设计的二分之一传动比, $\beta = \theta/2$ 。水平旋转角 α 用于跟踪轨道面内的偏转角度,竖直俯仰角度 β 用于跟踪偏离轨道平面 M 的俯仰角度。空间激光通信终端跟踪到的四路通信光经过卡式系统 K 后,由后续分光系统使其在空间相互错开后形成四路光1'、2'、3'、4'(如图2所示),1'、

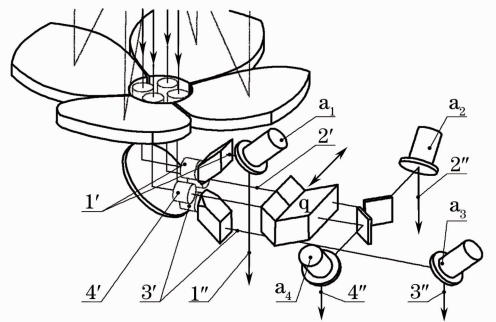


图3 光学天线后续光路分光系统

Fig. 3 Optical antenna subsequent optical path splitting system

2'、3'、4'四路光通过各自振镜 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 (如图 3 所示) 做进一步的精确指向, 调整后成 1''、2''、3''、4'' 方向。光学棱镜 q 用于光束 2' 与光束 4' 切换, 以节省系统空间方便控制。

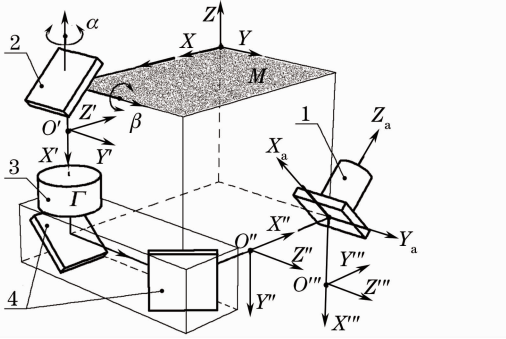


图 4 反射镜坐标系建立示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mirror coordinate system establishment

3 链路激光通信终端光学对准跟踪数学模型

四块平面反射镜光学天线置于链路节点上, 较高轨道上的激光通信终端天线平面与赤道面 M_0 重合, 较低轨道上的激光通信终端天线平面与近地轨道面 M 重合 (如图 1 所示)。如图 2 所示, 光束 1 和 3 用于同轨道上节点间激光通信终端的信息链接, 光束 2 和 4 用于异轨节点间激光通信终端的信息链接。位于不同轨道上激光通信终端之间的光学链接对准^[13] 最具有代表性, 以位于较低轨道平面上激光通信终端光束 2 对位于较高轨道平面上激光通信终端光束 4 之间动态数学关系式为例予以具体说明。位于较低轨道平面节点处激光通信终端四反射镜光学天线, 其跟踪对准光束 2 所对应的光路结构形式可抽象为图 4。在图 4 中, M 为轨道面, 2 为图 2 中光束 2 的跟踪镜, 跟踪镜的扫描范围由电机驱动结构的水平转角 α 和俯仰转角 β 来控制。图 4 中 x 为入射光轴方向, 物坐标 $OXYZ$ 经图 4 所示各光学元件反射后的像坐标依次为 $O'X'Y'Z'$ 、 $O''X''Y''Z''$ 、 $O'''X'''Y'''Z'''$, 卡氏系统 3 的放大

倍率为 Γ , 与反射镜 4 相互固定可视为一个光学元件。 $O_a X_a Y_a Z_a$ 为振镜坐标。上述各坐标系间的关系式可由如下基底转换矩阵依次过渡。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_4 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

卫星间激光通信终端的链路连接由光学跟踪对准来完成, 而光学跟踪对准可视为运动状态下对双节点连线方向 \mathbf{A} 的准确成像。该方向 \mathbf{A} 可表示为 x 方向的单位矢量 \mathbf{i} 依次绕 y 轴旋转 θ' 角后再绕 z 轴旋转 α' 角形成, 对应的旋转矩阵分别为 $\mathbf{S}(y, \theta')$ 和 $\mathbf{S}(z, \alpha')$, 得

$$\mathbf{A} = \mathbf{S}(z, \alpha') \mathbf{S}(y, \theta') \mathbf{i}. \quad (5)$$

链路光学天线通过控制驱动电机调整跟踪镜的水平转角 α 和俯仰转角 β 进行光束对接, 设其旋转矩阵分别为 $\mathbf{S}(z, \alpha)$ 和 $\mathbf{S}(y, \beta)$, 则该复合运动为

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta). \quad (6)$$

设该运动在轨道面 M 内的跟踪角误差为 $\Delta\alpha$, 相对轨道面 M 的俯仰跟踪角误差为 $\Delta\theta$, 则有: $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha$; $\Delta\theta = \theta' - \theta$ 。该值一般可由接收信标光的 CCD 直接获取并反馈给 APT 系统, 给振镜提供控制参数值。

将 \mathbf{A} 经光学天线反射镜 2 动态成像^[14], 并将物和像分别在自身坐标系内标定, 则有

$$\mathbf{A}'_m = \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{S} \mathbf{R}_1 \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A}. \quad (7)$$

将(5)式和(6)式代入(7)式, 并对微量转动时的旋转矩阵简化得

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'_m &= \mathbf{R}_1^{-1} [\mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta)] \mathbf{R}_1 [\mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta)]^{-1} \mathbf{S}(z, \alpha') \mathbf{S}(y, \theta') \mathbf{i} = \\ &= [\mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta) \mathbf{R}_1 \mathbf{S}(y, -\beta) \mathbf{S}(y, \theta) + \Delta\alpha \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta) \mathbf{R}_1 \mathbf{S}(y, -\beta) \mathbf{P}_z \mathbf{S}(y, \theta) + \\ &\quad \Delta\theta \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{S}(z, \alpha) \mathbf{S}(y, \beta) \mathbf{R}_1 \mathbf{S}(y, -\beta) \mathbf{P}_y \mathbf{S}(y, \theta)] \mathbf{i}. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式中, 转轴矩阵 \mathbf{P} 、旋转矩阵 \mathbf{S} 对应绕不同转轴旋转不同角度的表达式如下:

$$\mathbf{S}(z, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{S}(y, \beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{S}(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{S}(y, -\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_z = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

结合(1)~(4)式和(9)~(14)式,将(8)式进行化简得

$$\mathbf{A}'_m = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \Delta\alpha \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \alpha \cos 2\beta \\ \sin \alpha \cos 2\beta \end{pmatrix} + 2\Delta\beta \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (15)$$

物 \mathbf{A}'_m 经图4中的卡式系统3与平面反射镜4后像为 \mathbf{A}''_m ,根据静态物像关系式, $\mathbf{A}''_m = \mathbf{B}\mathbf{A}'_m$, \mathbf{B} 为光学系统的倍率矩阵。 \mathbf{A}''_m 经振镜1为动态成像,设像为 \mathbf{A}'''_m ,并将振镜运动的旋转矩阵在振镜坐标系内标定得

$$\mathbf{A}'''_m = \mathbf{R}_3^{-1}(\mathbf{R}_4 \mathbf{S}_4 \mathbf{R}_4^{-1})\mathbf{R}_3(\mathbf{R}_4 \mathbf{S}_4 \mathbf{R}_4^{-1})^{-1}\mathbf{B}\mathbf{A}'_m. \quad (16)$$

振镜为微量转动,设转角为 φ ,则(16)式可简化为

$$\mathbf{A}'''_m = \mathbf{R}_3^{-1}\mathbf{R}_4(\mathbf{E} + \varphi\mathbf{P}_4)\mathbf{R}_4^{-1}\mathbf{R}_3\mathbf{R}_4(\mathbf{E} - \varphi\mathbf{P}_4)\mathbf{R}_4^{-1}\mathbf{B}\mathbf{A}'_m = [\mathbf{E} + \varphi(\mathbf{R}_3^{-1}\mathbf{R}_4\mathbf{P}_4\mathbf{R}_4^{-1}\mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_4\mathbf{P}_4\mathbf{R}_4^{-1})]\mathbf{B}\mathbf{A}'_m. \quad (17)$$

(17)式中,光学系统的倍率矩阵 \mathbf{B} 和转轴矩阵 \mathbf{P}_4 的表达式如下:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

将(18)式和(19)式代入(17)式中,经矩阵运算得

$$\mathbf{A}'''_m = \begin{pmatrix} 1 \\ \Gamma\Delta\alpha\cos \alpha \cos 2\beta + 2\Gamma\Delta\beta\sin \alpha - 2\varphi p_y \\ \Gamma\Delta\alpha\sin \alpha \cos 2\beta - 2\Gamma\Delta\beta\cos \alpha - \varphi p_x \end{pmatrix}. \quad (20)$$

两激光通信终端光束精确对准应实时满足如下数学模型:

$$\varphi_{p_y} = \Gamma(\Delta\alpha/2 \cdot \cos \alpha \cos 2\beta + \Delta\beta\sin \alpha), \quad (21)$$

$$\varphi_{p_x} = \Gamma(\Delta\alpha \cdot \sin \alpha \cos 2\beta - 2\Delta\beta\cos \alpha). \quad (22)$$

像面所对应轨面方向的偏差可通过振镜绕 Y_a 轴转动 φ_{p_y} 角补偿,对轨道面俯仰偏差可通过振镜绕 X_a 轴的转动 φ_{p_x} 角来补偿。

位于不同轨道面上的激光通信终端可在两轨道升交点附近进行信息交换,当承担信息交换的两颗卫星间的距离超过某一数值时,两轨道信息传递任务可以交给下一时刻的一对卫星来完成。

如图5所示,以地心为坐标原点,较高轨面 M_0 与较低轨面 M 的交线为 x 轴方向,建立近地轨道面坐标系 $OXYZ$ 和赤道面坐标系 $O'X'Y'Z'$, φ_1 为较低轨道上的卫星初相位, ω_1 为角速度, φ_2 为较高轨道上的卫星初相位, ω_2 为角速度, γ 为地球半径为, h 为近地轨道1距地面高, H 为远地轨道2距地面高。 ψ 为较低轨道平面与较高轨道平面之间的夹角, β 为光学天线跟踪镜俯仰角度, α 为光学天线跟踪镜水平摆动角。位于不同轨道的两颗卫星 t 时刻在 S'_1 点和 S'_2 点的坐标为

$$(x_1, y_1, z_1) = (\gamma + h)[\cos(\varphi_1 + \omega_1 t), \sin(\varphi_1 + \omega_1 t), 0], \quad (23)$$

$$(x'_2, y'_2, z'_2) = (\gamma + H)[\cos(\varphi_2 + \omega_2 t), \sin(\varphi_2 + \omega_2 t), 0]. \quad (24)$$

将 S'_2 点在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 下表示形式转换为在坐标系 $OXYZ$ 下的表示形式,则有

$$(x_2, y_2, z_2) = (\gamma + H)[\cos(\varphi_2 + \omega_2 t), \sin(\varphi_2 + \omega_2 t)\cos \psi, -\sin(\varphi_2 + \omega_2 t)\sin \psi]. \quad (25)$$

由图5近地轨道面与赤道面坐标几何关系,得 $\beta = 1/2 \tan^{-1}[-\sin \psi \sin(\varphi_2 + \omega_2 t)(\gamma + H)/c]$,
(26)

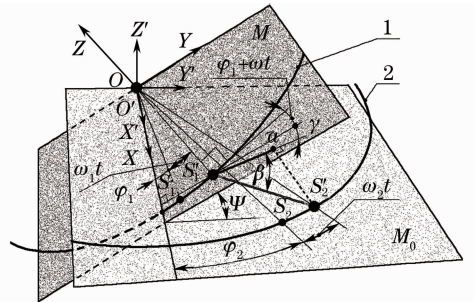


图5 近地轨道面与赤道面坐标示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the near-earth orbit plane and equatorial plane coordinate

$$\alpha = \varphi_1 + \omega_1 t + \sin^{-1} \{ [(\gamma + H) \cos \psi \sin(\varphi_2 + \omega_2 t) - (\gamma + h) \sin(\varphi_1 + \omega_1 t)] / c \}. \quad (27)$$

在(26)式和(27)式中, c 代表的参量关系如(28)式所示

$$c = \{ [(\gamma + H) \cos(\varphi_2 + \omega_2 t) - (\gamma + h) \cos(\varphi_1 + \omega_1 t)]^2 + [(\gamma + H) \cos \psi \sin(\varphi_2 + \omega_2 t) - (\gamma + h) \sin(\varphi_1 + \omega_1 t)]^2 \}^{1/2}. \quad (28)$$

(26)式和(27)式代表异轨卫星激光通信终端光学天线跟踪角 α 和 β 与卫星位置之间的关系。联立(21)、(22)、(27)和(28)式即可确定链路天线较低轨道对较高轨道光学跟踪对准数学模型。激光通信终端光学天线跟踪反射镜结构方案形式表明水平跟踪角 α 工作范围为 $\pm 90^\circ$, 竖直俯仰跟踪角 β 工作范围为 $\pm 35^\circ$ 。同轨道对接时 $\alpha'_1 = -15^\circ, \alpha_1 = 15^\circ$, 若不考虑同轨道两颗卫星激光通信终端光学天线 M 面对轨道面的偏离时, 可取 $\beta = 0$ 。将 $\beta = 0$ 代入(21)式和(22)式得 $\varphi_{p_y} = (\Gamma \Delta \alpha \cos \alpha) / 2, \varphi_{p_x} = -2 \Gamma \Delta \beta \cos \alpha$ 。

4 链路光学天线动态跟踪数据仿真分析

空间激光通信全光链路组网, 位于同轨道卫星上的激光通信终端通过光学天线头四跟踪反射镜的一对反射镜进行信号光实时跟踪对准, 实现同轨道卫星间的信息传递。另一对反射镜用于两激光通信终端在升交点附近进行异轨的信息传递。这样可通过近地轨道和远地轨道布置多颗卫星实现全球全光网络覆盖。

卫星在轨运行的过程中, 激光通信终端光学天线头四跟踪反射镜在伺服系统的控制下进行跟踪对准, 要保证精确的光束对准需要振镜做精确的补偿。激光通信终端跟踪反射镜在水平扫描转动和俯仰扫描转动的过程中, 利用软件模拟出振镜绕 X_a 轴和 Y_a 轴转动对光束精确对准所做出补偿的仿真曲面。如图 6 所示, 当跟踪反射镜水平转角和俯仰转角相对于理论零位偏差较大时, 振镜绕 X_a 轴转动量较小但补偿精度要求较高。如图 7 所示, 当跟踪反射镜水平转角和俯仰转角相对于理论零位偏差较大时, 振镜绕 Y_a 轴转动量较大但补偿精度要求较低。空间激光通信终端在轨组网的过程中, 光学天线头四跟踪反射镜的位置都不在理论零位, 卫星上激光通信终端间的光束对接, 应用时跟踪镜的位置相对于理论零位水平和俯仰都有角度, 故振镜所做出的补偿通

常在图 6 和图 7 仿真曲面中间的某个位置, 将具体参数代入(21)式和(22)式可得到具体数值。

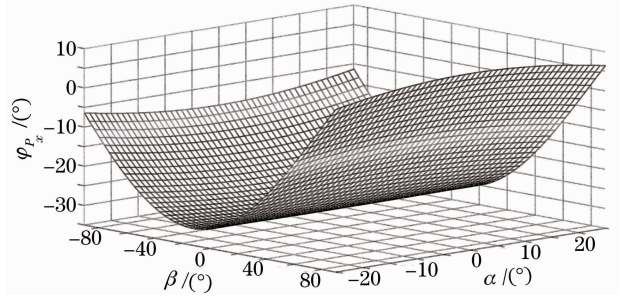


图 6 振镜绕 X_a 轴转动对跟踪光束的精确补偿
Fig. 6 Galvanometer rotation around the X_a -axis compensation accuracy of the tracking beam

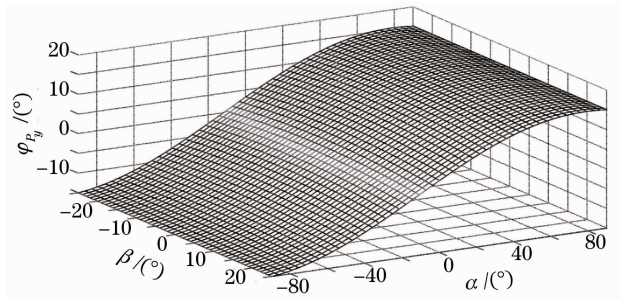


图 7 振镜绕 Y_a 轴转动对跟踪光束的精确补偿
Fig. 7 Galvanometer rotation around the Y_a -axis compensation accuracy of the tracking beam

同一轨道卫星间激光通信终端链路组网, 两跟踪反射镜水平和俯仰转动角度较小, 由于同轨道卫星运行速度一致, 之间距离相对稳定, 较易实现光束对接光网路互联。不同轨道上的卫星在升交点附近进行信息传递, 由于轨道高度不一样, 其运行速度也不一致。利用 Matlab 软件进行数据模拟, 仿真出异轨两颗卫星在升交点附近进行信息交换时, 跟踪镜周视转角和俯仰转角随时间变化的仿真曲线如图 8 和图 9 所示。异轨卫星在升交点附近进行信息交换需要 6 min 左右。近地轨道卫星运行速度较快, 两颗正在进行信息传递的异轨卫星在信息交换结束前, 下一时刻处于不同轨道的两颗卫星天线跟踪镜就要对准, 在上一时刻两颗交换信息的异轨卫星即将超出通信范围时, 下一时刻两颗异轨卫星马上接着信息传递。从图 8 仿真曲线可知, 异轨卫星在信息传递时间内跟踪反射镜水平转动角度 α 变化在 3° 范围内; 从图 9 仿真曲线可知异轨卫星在信息传递时间内跟踪反射镜俯仰转动角度 β 变化在 9° 范围内。水平转角 α 和俯仰转角 β 具体数值可由(26)式和(27)式算出。

较低轨道相对地面与较高轨道相对较低轨道的

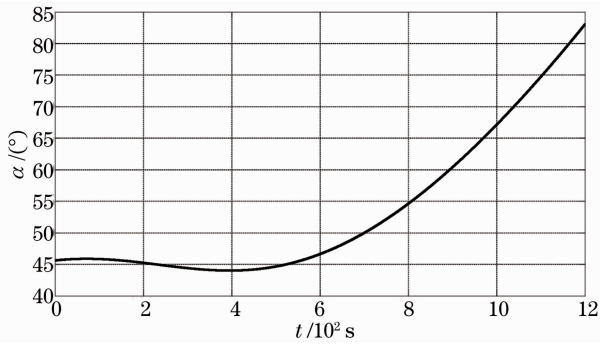


图 8 异轨通信卫星跟踪反射镜水平转动角度

Fig. 8 Horizontal rotation angle of tracking mirror of the different orbits communication satellite

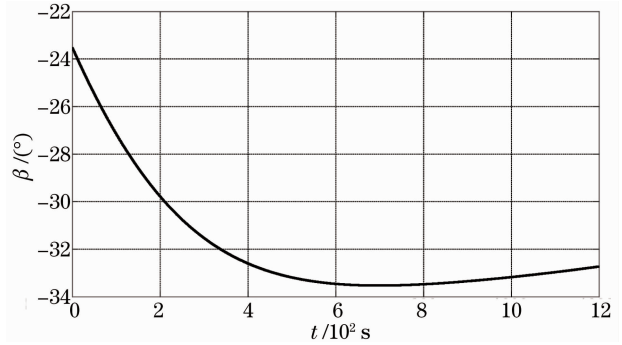


图 9 异轨通信卫星跟踪反射镜俯仰转动角度

Fig. 9 Pitching rotation angle of tracking mirror of the different orbits communication satellite

情况类似,只是相对低轨卫星而言,地面站为静止的。以中国为例,列出位于青海湖上方的卫星对中

国主要地理位置特征点的跟踪角及通信距离 L ,见表 1。可见提出的轨面四跟踪反射镜周视转角 α 和俯仰转角 2β 都能基本满足通信所需的要求。

表 1 激光通信终端对地面站的跟踪角及距离

Table 1 Laser communication terminal ground stations tracking angle and distance

	Fuyuan	Mehe	Beijing	Urumqi	Xichang	Lasa	Khunjerab	Shanghai
$\alpha / (^{\circ})$	46.3	39.7	33.2	-17.6	-2.3	-27.4	-40	36.4
$2\beta / (^{\circ})$	11.9	24.8	0	26.4	-21.5	26.4	17.2	-20.1
L / km	2022	1787	1270	1242	1082	1181	1613	1523

5 结 论

提出了轨面四跟踪平面反射镜光学天线头,通过伺服系统控制实现同轨道卫星互联、异轨道卫星交互以及与地面站连接的多动态跟踪功能。利用动态光学理论对卫星间激光通信终端光束实时稳定对准进行数学建模,仿真结果指导 ATP 系统控制四跟踪反射镜的驱动电机以及对应振镜补偿控制装置。对提出的低轨双链路组网方案以及对对中国主要地面通信站激光通信终端间水平和俯仰跟踪角度测量,满足轨面四跟踪平面反射镜周视和俯仰摆动范围。四跟踪平面反射镜一体化动态结构特点(共用同一卡氏系统),利于轻小型化设计,并结合拟采用的空间相干激光通信技术,光学天线口径只需在几十毫米以内,这对减轻卫星负载十分有利。

参 考 文 献

- Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Establishment of space light mixer mathematical model based on the space coherent laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706024.
郑 阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器数学模型的建立[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706024.
- Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, *et al.*. Effect of amplitude profile difference of signal and local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1006001.

刘宏展, 纪越峰, 许 楠, 等. 信号光与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006001.

- Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Optomechanical structure design of the space optical hybrid based space coherent laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906008.
郑 阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906008.
- Le Zichun, Hou Jibin, Fu Minglei, *et al.*. Design and performance analysis of the node architecture for light-trail network[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3037-3040.
乐孜纯, 侯继斌, 付明磊, 等. 光轨网络节点结构设计及性能分析[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3037-3040.
- Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡 源, 丁 莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- M Gregory, F Heine, H Kämpfner, *et al.*. Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on homodyne BPSK[C]. SPIE, 2010, 7587: 75870E.
- Yang Junbo, Li Xiujian, Yang Jiankun, *et al.*. Optical matrix computing of rearrangeable optical interconnection network in free space[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1762-1771.
杨俊波, 李修建, 杨建坤, 等. 自由空间可重构光互连网络的光学矩阵运算[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1762-1771.
- Hu Hefei, Liu Yuan'an. Application of high data-rate space laser communication system in aerospace information networks [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1270-1274.
胡鹤飞, 刘元安. 高速空间激光通信系统在空天信息网中的应用[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1270-1274.
- Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wu Jili, *et al.*. Demonstration system design of double-layered optical satellite network [J].

- Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1974-1977.
- 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼, 等. 双层卫星光网络仿真演示系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1974-1977.
- 10 Jiang Huilin, Hu Yuan, Song Yansong, *et al.*. Research on space laser communication network[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5): 52-58.
- 姜会林, 胡 源, 宋延嵩, 等. 空间激光通信组网光端机技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 52-58.
- 11 Li Yongjun, Wu Jili, Zhao Shanghong, *et al.*. A novel two-layered optical satellite network of LEO/MEO with zero phase factor[J]. Science China Information Science, 2010, 53(6): 1261-1276.
- 12 Zhu Zhencai, Yang Genqing, Yu Jinpei, *et al.*. The development of micro-satellite network and formation technologies [J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(6): 46-49.
- 朱振才, 杨根庆, 余金培, 等. 微小卫星组网与编队技术的发展[J]. 上海航天, 2004, 21(6): 46-49.
- 13 Wu Jili, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Quantum limits of far-field beam pointing accuracy in space[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0106004.
- 吴继礼, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间远场光束对准精度的量子极限[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0106004.
- 14 Zheng Yang, Yu Ling, He Wenjun, *et al.*. Research on optical structure of liquid optics directional compensation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(z1): 45-46.
- 郑 阳, 于 玲, 贺文俊, 等. 液体光学定向补偿的光学结构研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(z1): 45-46.

栏目编辑: 王晓琰