

能量收发效率对共焦点反射式光通信 组网天线系统性能的影响

张涛^{1,2} 付强^{1,2*} 姜会林^{1,2} 曹桂兴³

¹ 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

² 长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

³ 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094

摘要 激光通信组网天线系统能量发射效率与接收效率的高低决定了其通信能力的强弱。针对这一问题, 提出了一种新型组网天线系统基本模型, 分析其能量发射效率与接收效率的算法并进行数学建模, 推导出了其能量发射效率与接收效率的计算公式, 深入讨论了能量发射效率和能量接收效率与旋转抛物面上下开口直径、焦距以及会聚透镜单元口径、焦距等光学结构参数的准确函数关系, 相关结论可应用于激光通信组网天线光学结构的设计与优化。最后以三颗低地球轨道(LEO)卫星在距离 1000 km 范围内、以高于 2.5 Gb/s 的速率进行组网通信为背景, 通过分析和计算得出满足通信条件的激光器最小发射功率、组网天线系统的发射效率随跟踪通信角度的变化曲线以及接收效率。

关键词 光通信; 组网; 天线系统; 旋转抛物面; 能量效率

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1206002

Effects of Transmitting and Receiving Energy Efficiency on the Performance of Co-Focal Reflective Type Laser Communication Networking Antenna System

Zhang Tao^{1,2} Fu Qiang^{1,2} Jiang Huilin^{1,2} Cao Guixing³

¹ *Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

² *Key Laboratory of Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer
Technology, Education of Ministry, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

³ *China Academy of Space Technology Institute of Telecommunication Satellite, Beijing 100094, China*

Abstract The communication ability of the laser communication networking antenna is determined by its transmitting and receiving efficiency. A new type of networking model of antenna system is proposed, and the algorithm of transmitting and receiving energy efficiency is analyzed through mathematical model. Based on this model, the equation of transmitting and receiving energy efficiency is derived. After that, the accurate functional relationships between the energy transmitting and receiving efficiency with optical structure parameters such as opening up and down diameters, focal length of rotating paraboloid, unit aperture and focal length of converging lens are discussed. These conclusions can be applied to the structure design and optimization of laser optical communication networking antenna. Finally, under the background of three (low earth orbit) LEO satellites within 1000 kilometers of networking communication system and the velocity up to 2.5 Gb/s, the minimum laser power that

收稿日期: 2016-05-28; 收到修改稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 张涛(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事激光通信技术等方面的研究。E-mail: bcxyqc@163.com

导师简介: 姜会林(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光通信、光学总体设计等方面的研究。

E-mail: Hjiang@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: cust_fuqiang@163.com

satisfies the communication situation, the curves reflecting the changes of transmitting efficiency with tracking communication angle, and the receiving efficiency of the networking antenna system are calculated and analyzed.

Key words optical communications; networking; antenna system; rotating paraboloid; energy efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.4258; 060.1155; 060.2605

1 引 言

微波通信受无线电载波频率的限制,较难达到数 Gb/s 甚至数十 Gb/s 的高速率传输和高质量信息的实时获取。相比之下,激光通信具有明显优势:能耗低,带宽大,数据传输速率高,通信终端尺寸小并且抗干扰保密性好,特别适用于卫星等载荷能力有限但数据传输量大的通信平台^[1-2]。美国、日本和欧洲一些国家均在 20 世纪较早开展了激光通信技术研究,以美国喷气推进实验室、欧洲航空航天局、德国航天局以及日本宇宙航空开发机构和国家信息与通信技术协会为代表的空间光通信先驱进行了一系列成功的实验,展示了激光通信的巨大潜力^[3-4]。2008 年,德国 TerraSAR-X 卫星与美国 NFIRE 卫星成功地在 3800~4900 km 的范围内以 5.625 Gb/s 的速率实现通信,标志着激光通信技术向实用化迈进了一大步^[5]。但是,目前国际上仅能实现在两点间进行激光通信,尚未解决在多平台之间进行组网通信的问题,在公开报道中,只有美国陆军实验室在 2015 年进行了以旋转双曲面作为光学通信天线的实验,并取得了一定成果^[6]。实现激光通信组网的核心条件是每个平台的的天线系统同时对其他多个平台进行动态、大范围的双工通信^[7-8],而组网天线系统的能量发射效率与接收效率是评价其通信能力的重要指标,目前尚未有针对这一问题的具体算法,解决该问题将是激光通信组网技术迈向工程化应用的重要一步。

本文介绍了一种结构简单、易于轻小型化的新型激光通信组网光学天线系统,建立了光学天线系统的通信发射模型,推导出了组网天线系统能量发射效率、能量接收效率以及跟踪通信范围与旋转抛物面上上下开口直径、焦距和透镜单元口径之间的函数关系,该研究结论可作为推进激光通信组网技术实现工程化应用的重要依据以及评价组网天线系统性能的重要方法。

2 共焦点反射式激光通信组网天线系统

旋转抛物面具有“当入射光线射向其焦点时,在其外表面的反射光线与旋转轴平行”的光学性质,即无论光线从任何方向入射,只要射向旋转抛物面的焦点都将被反射为平行于旋转轴的出射光线^[9]。因此,若一个会聚透镜单元的焦点与旋转抛物面焦点相重合,当一束激光平行于会聚透镜单元的光轴入射时,将被折转为平行于旋转抛物面光轴的平行光束出射,应用软件 Light-tools 模拟其光学原理如图 1 所示,图中 P 点指的是旋转抛物面的焦点,receiver_8 表示模拟的能量接收面。

与基于旋转抛物面切面的多个平面反射镜结构组网天线系统不同^[9-10],新型共焦点反射式激光通信组网天线系统以旋转抛物面反射镜为中心,多个会聚透镜单元的焦点与其焦点相重合,并环绕于其周围,和相关控制结构、计算机软件系统等构成共焦点反射式结构,如图 2 所示。当其他节点发射的信号激光束到达此光学天线系统时,光学天线系统将根据入射信号光源的位置选择最佳会聚透镜单元,在圆弧形导轨上调整其方位角和俯仰角进行指向、捕捉和跟踪,使会聚透镜单元的光轴与入射激光束的光轴平行,进而使入射信号光

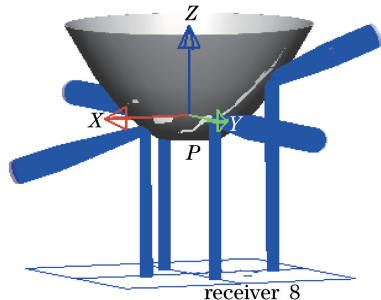


图 1 一对多激光通信组网天线光学原理模拟
Fig. 1 Optical principle simulation for one-to-many laser communication networking antenna

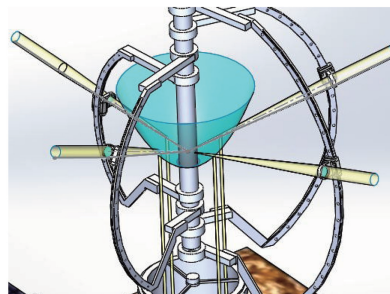


图 2 多平台组网激光通信光学天线系统结构示意图
Fig. 2 Structural schematic diagram of multi-platform networking laser communication antenna system

束经过透镜单元后向其焦点处会聚,此时入射激光束经此天线系统后会聚在共用的焦点处。此天线系统加载在通信光端机卡氏中继系统之前并与其形成共轴系统,可实现不同平台间组网通信,并具有动态范围大、结构简单、易于小型化等优点^[11-12]。

3 组网天线系统的能量利用效率分析

3.1 能量发射效率分析

根据图 3 所示的系统光路追迹结果可知,当光束从某一方向入射,经组网天线系统折转后平行射向卡氏中继系统,再经后续光路最终到达探测器成为有效通信光束。因此根据光路可逆原理,当信号光束从卡氏中继系统出射时,组网天线系统的能量发射效率应为入射光束在中继光学系统主镜上的投影截面积与卡氏中继系统主镜面积之比。

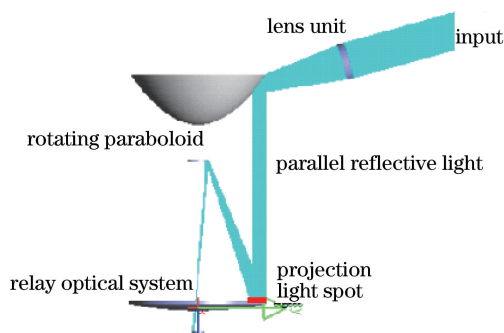


图 3 卡氏系统光束追迹示意图

Fig. 3 Beam tracing diagram of Cassegrain system

设旋转抛物面与会聚透镜单元 L 的共用焦点 O 为坐标原点,建立三维直角坐标系如图 4 所示。抛物线为旋转抛物面在 YOZ 平面的截面,OC 为透镜单元 L 的光轴,设透镜单元 L 的口径 AB = d,焦距为 f,经过透镜单元入射的会聚光束半圆锥角即边缘光线 OA、OB 和光轴 OC 夹角为 θ ,透镜单元的跟踪通信俯仰角即光轴 OC 与 Y 轴的夹角为 α ,P(0, -p) 为抛物线顶点。

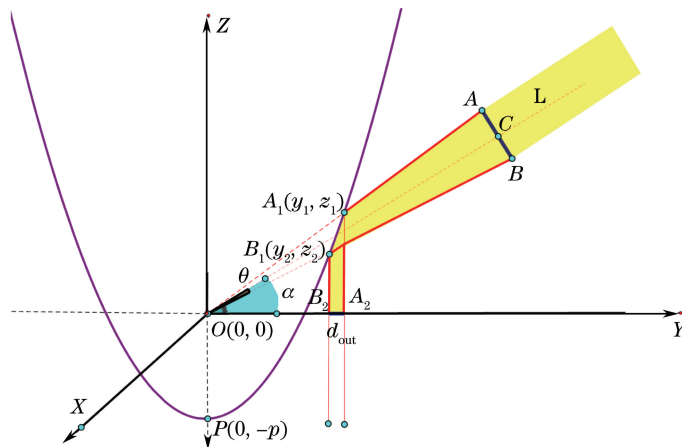


图 4 入射光束在 YOZ 平面的截面图

Fig. 4 Sectional view on YOZ plane for incident light

根据图 4 所示几何关系可知,在 YOZ 平面中

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (1)$$

设入射会聚光束圆锥表面的空间方向向量为 $\mathbf{v} = (0, 1, \tan \theta)$,对于会聚光束外表面上一点 $M(x, y, z)$,会聚光束的圆锥曲面方程可表示为

$$y^2 + z^2 \tan^2 \alpha + 2yz \tan \alpha - \cos^2 \theta \sec^2 \alpha (x^2 + y^2 + z^2) = 0, \quad (2)$$

旋转抛物外反射面的方程可表示为

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4p} - p。 \quad (3)$$

根据(2)和(3)式可得入射信号光束经透镜单元 L 和旋转抛物面外表面进行光路折转后在卡氏中继系统主镜的投影外边缘曲线方程为

$$f(x, y) = \cos^2\theta \sec^2\alpha x^2 + (\cos^2\theta \sec^2\alpha - 1) y^2 + (\cos^2\theta \sec^2\alpha - \tan^2\alpha) \cdot \left(\frac{x^2 + y^2}{4p} - p \right)^2 - 2y \tan\alpha \left(\frac{x^2 + y^2}{4p} - p \right), \quad (4)$$

在 YOZ 截面上的抛物线方程可表示为

$$z = \frac{y^2}{4p} - p。 \quad (5)$$

通过解析几何计算可得上边缘光线 OA 与抛物线交点的 Y 轴坐标即为投影外边缘曲线积分上限,其表达式为

$$y_1 = 2p \tan(\alpha + \theta) + 2p \sec(\alpha + \theta), \quad (6)$$

同理可得下边缘光线 OB 与抛物线交点的 Y 轴坐标即为积分下限,表达式为

$$y_2 = 2p \tan(\alpha - \theta) + 2p \sec(\alpha - \theta), \quad (7)$$

则入射光束在卡氏中继系统主镜上的投影截面积 S_p 可表示为

$$S_p = \frac{1}{2} \left(y - \frac{2p \cos \alpha}{\sin \alpha - \cos \theta} \right) \sqrt{\frac{4p^2 \sin^2 \theta}{(\cos \theta - \sin \alpha)^2} - \left(y - \frac{2p \cos \alpha}{\cos \theta - \sin \alpha} \right)^2} + \frac{2p^2 \sin^2 \theta}{(\cos \theta - \sin \alpha)^2} \cdot \arcsin \frac{(\cos \theta - \sin \alpha) y - 2p \cos \alpha}{2p \sin \theta}。 \quad (8)$$

当信号光束从卡氏中继系统主镜发射,光束直径等于主镜口径设为 D_0 ,则卡氏中继系统主镜发射光束截面面积为 $S_t = \pi (D_0/2)^2$,因此该组网光学天线系统的发射效率可表示为

$$\eta_t = \frac{S_p}{S_t} = \frac{4p^2 \sin^2(\arctan \theta)}{D_0^2 \cdot [\sin(-\arctan \alpha + \arctan \theta) - \cos(\arctan \theta)]^2}。 \quad (9)$$

由(9)式可知,该天线系统的发射效率 η_t 随跟踪俯仰角 α 的增大而单调递增,即当 $\alpha = \alpha_{\max}$ 时能量发射效率 η_t 最大, $\alpha = \alpha_{\min}$ 时能量发射效率 η_t 最小。因此对某一组网天线系统而言,首先需要确定 α 的变化范围,进而求得 η_t 的变化范围。

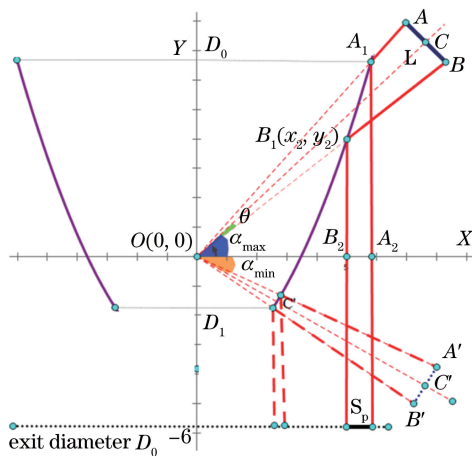


图 5 入射光束投影与俯仰角 α 变化关系示意图

Fig. 5 Relationship between incident light projection and pitch angle α

为求跟踪俯仰角 α 的变化范围,设图 5 中旋转抛物面的上开口直径等于卡氏中继系统主镜口径 D_0 ,为了便于天线系统的结构装调,考虑设置旋转抛物面的下开口直径为 D_1 ,透镜单元直径为 d 。则系统的跟踪俯仰角 α 的最大值 α_{\max} 和最小值 α_{\min} 分别表示为

$$\alpha_{\max} = \arctan\left(\frac{D_0}{4p} - \frac{p}{D_0}\right) - \arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}}, \quad (10)$$

$$\alpha_{\min} = \arctan\left(\frac{D_1}{4p} - \frac{p}{D_1}\right) + \arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}}. \quad (11)$$

根据前文所述,当 α 取最小值 α_{\min} 时出射光束的能量发射效率最小,此时能量发射效率 η_{\min} 可表示为

$$\eta_{\min} = \frac{S_p}{S_t} = \frac{4p^2 \sin^2 \left[\arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right]}{D_0^2 \cdot \left\{ \sin \left[-\arctan\left(\frac{D_1}{4p} - \frac{p}{D_1}\right) + \arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right] - \cos \left[\arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right] \right\}^2}. \quad (12)$$

当 α 取最大值时,出射光束的能量发射效率为最大,此时能量发射效率 η_{\max} 可表示为

$$\eta_{\max} = \frac{S_p}{S_t} = \frac{4p^2 \sin^2 \left[\arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right]}{D_0^2 \cdot \left\{ \sin \left[-\arctan\left(\frac{D_0}{4p} - \frac{p}{D_0}\right) + \arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right] - \cos \left[\arctan \frac{d}{2\sqrt{D_0^2 + \left(\frac{D_0^2}{4p} - p\right)^2}} \right] \right\}^2}. \quad (13)$$

由(12)和(13)式可以得出结论,组网天线系统的能量发射效率 η_t 的大小取决于旋转抛物面上下开口直径 D_0 、 D_1 , 焦距 p 以及透镜单元口径 d 的设计取值。因此可以通过此函数关系调整相关参数来优化系统的能量发射效率。基于此结论,设旋转抛物面方程为 $x^2 + y^2 = 4pz$, d 的取值范围为 $[1 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$, 焦距 p 的取值范围为 $[1 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$, 曲率半径上限为 200 mm , 曲率半径下限为 40 mm 。

将上述参数代入(12)、(13)式,当 p 和 d 在给定区间内变化时发射效率 η_t 的优化结果如图 6 所示。由图 6 可知,天线系统的发射效率 η_t 与透镜单元口径 d 、旋转抛物面焦距 p 两个参数均为单调递增关系。因此,当旋转抛物面上下开口口径 D_0 、 D_1 确定时,天线系统的发射增益大小决定于 d 和 p 的值,因此,提高天线系统的信号增益可以通过增大跟踪透镜单元口径和增大旋转抛物面焦距实现。

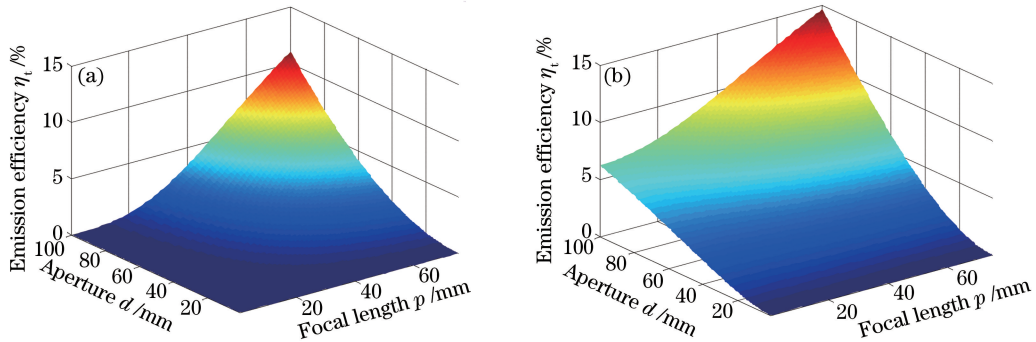


图 6 能量发射效率 η_t 随参数 p 和 d 变化的优化结果。(a) $\alpha = \alpha_{\min}$; (b) $\alpha = \alpha_{\max}$

Fig. 6 Optimization of η_t versus p and d . (a) $\alpha = \alpha_{\min}$; (b) $\alpha = \alpha_{\max}$

3.2 能量接收效率分析

若利用两个分别加载了组网天线系统的平台进行激光通信,设光束以衍射极限角发射,则接收平台经天线系统接收后到达探测器的能量方程可表示为

$$P_r = P_t \eta_t G_t \eta_{ot} L_s \eta_s G_r \eta_{or}, \quad (14)$$

式中 P_r 为接收的信号能量; P_t 为发射单元的发射功率; η_t 为组网天线系统发射效率; G_t 为发射光学天线增益^[7]; η_{ot} 为光端机光学单元的发射效率; L_s 为自由空间引起的链路衰减; η_s 为信道引起的功率损失(对于自由空间激光通信,其值近似为 1); G_r 为接收光学天线增益; η_{or} 为接收光学系统效率。

设自由空间里的两个通信平台为 A 和 B,通信距离为 L ,设通信发射端 A 和接收端 B 的组网天线的透镜单元口径分别为 d_1 和 d_2 ,发射端激光波长为 λ ,则发射端组网天线增益表达式为

$$G_t = \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \right)^2. \quad (15)$$

自由空间损耗不考虑信道各种吸收和散射衰减,而仅考虑空间传输引起的几何衰减,因此自由空间激光通信衰减可表示为

$$L_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2, \quad (16)$$

接收端组网天线增益为

$$G_r = \left(\frac{\pi d_2}{\lambda} \right)^2. \quad (17)$$

对(14)式进行化简,接收端的接收能量 P_r 可表示为

$$P_r = P_t \eta_{ot} \eta_{or} \eta_t \left(\frac{\pi^2 d_1 d_2}{4\pi \lambda L} \right)^2. \quad (18)$$

由(18)式可以得出结论:在通信平台的两端分别加入组网天线之后探测面所接收的能量 P_r 与发射和接收组网天线系统的透镜单元直径 d_1 、 d_2 乘积的平方成正比。

若接收光端机利用卡氏中继系统主镜直接接收入射激光信号,设接收光端机主镜口径为 D_r ,则接收光端机增益表达式为

$$G_r = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda} \right)^2, \quad (19)$$

接收平台探测器所接收到的能量可表示为

$$P'_r = P_t \eta_{ot} \eta_{or} \eta_t \left(\frac{\pi^2 d_1 D_r}{4\pi \lambda L} \right)^2, \quad (20)$$

则可得能量接收效率为

$$\eta_r = \frac{P_r}{P'_r} = P \left(\frac{d_2}{D_r} \right)^2. \quad (21)$$

由(21)式可知,当接收光端机的主镜口径一定,其能量接收效率仅与接收端组网天线的透镜单元直径 d_2 相关,且与 d_2 的平方成正比。因此可以得出重要结论:设计中,使接收透镜单元口径 d_2 大于光端机主镜口径 D_r ,光端机的能量接收效率 η_r 可以优于一对一两点间光端机的通信接收效率。因此,可通过增加跟踪透镜单元的口径提高组网天线系统的信号接收增益。

通过对跟踪通信范围公式、信号发射效率公式、信号接收效率公式的分析可知,对天线系统的各个结构参数进行优化设计可以提高天线系统的信号接收与发射增益。

4 组网天线系统通信能量计算

4.1 低地球轨道(LEO)卫星群内组网通信初始条件

目前国际上把卫星间激光通信组网列为卫星通信的重要发展方向^[10],以此为背景假设低轨卫星群包含三颗相同的 LEO 卫星,主光端机卡氏中继系统主镜口径均为 60 mm,组网天线系统的旋转抛物面面型方程为 $x^2 + y^2 = 50z$,执行跟踪通信的会聚透镜单元的口径 $d = 48.5$ mm,焦距为 $f = 42$ mm,通信激光器以接近

衍射极限角发射,波长 $\lambda = 800 \text{ nm}$,通信光端机接收探测器的灵敏度均为 -30 dBm 。在两颗卫星之间的动态通信俯仰角 20° 范围内,若要在 1000 km 的距离内每颗卫星与其他两颗星均保持通信速率在 2.5 Gb/s 以上的动态双工通信,确定激光器通信发射最小能量的模型如图 7 所示。

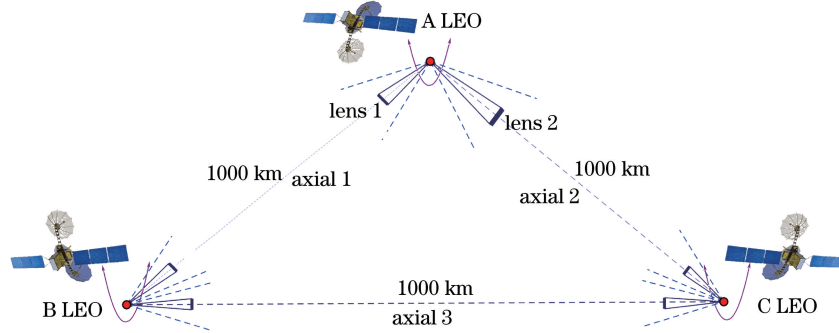


图 7 LEO 卫星群内组网通信模型示意图

Fig. 7 Model schematic diagram of LEO satellites for networking

要实现三颗卫星之间在 1000 km 内以 2.5 Gb/s 速率进行组网通信,发射激光光源的能量是一个关键参数。以其中一颗星为例,在 A LEO 天线与 B LEO 天线通信的一侧设计会聚透镜单元 lens 1,同时在 A LEO 天线与 C 天线通信的一侧设置会聚透镜单元 lens 2,位置关系如图 7 所示。通过分析从发射激光器到接收探测器的能量链路关系可确定激光器通信发射最小能量。

4.2 LEO 卫星群内组网通信链路能量分析

假设通信激光光源以近似衍射极限角进行发射,发射光路与接收光路的能量利用效率均为 70% ,即 $\eta_{ot} = \eta_{or} = 0.7$,因此发射与接收光路的能量损耗均为 $10\lg 0.7 = -1.5 \text{ dB}$ 。

当跟踪俯仰角 $\alpha = \alpha_{\min}$ 时,出射信号能量发射效率最小,此时组网天线系统的发射损耗表达式为

$$\eta_{\min} = \frac{p^2 d^2}{D_0^2 \cdot \left\{ f^2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4p} - \frac{D_1^2}{4p}}} \left(\frac{D_1}{8p} - \frac{2p}{D_1} - \frac{d}{2f} \right) \right]^2 \right\}}, \quad (22)$$

此时组网天线系统的能量发射损耗最大,为 $10\lg \eta_{\min}$ 。

由于 $d_1 = d_2 = d$,因此发射端组网天线增益可表示为 $10\lg \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2$ 。同理,接收端组网天线增益也可表示为 $10\lg \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2$ 。

由于通信激光为高斯光束并以接近光束衍射极限角发射,则空间能量损耗为 $10\lg \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2$ 。此外,由于 LEO 通信环境为自由空间,则其信道功率损耗 $10\lg \eta_s = 0$ 。

若要保持三颗 LEO 之间的组网通信速率达到 2.5 Gb/s ,则根据实测数据可知,到达接收探测器的能量应该为 -30 dBm 以上,需保留探测器接收面的安全余量为 3 dB 。

设激光器通信发射最小能量为 W ,通信接收端探测面实际接收能量功率为 E ,根据上述分析结果可推知星间组网通信链路的能量关系为

$$E = 10\lg(W \cdot 10^3) + 10\lg 0.7 + 10\lg \eta_{t,\min} + 10\lg \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 + 10\lg \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot 10^9} \right)^2 + 10\lg \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 + 10\lg(0.7 - 3) \geq -30 \text{ dBm}, \quad (23)$$

将已知条件代入(23)式,可解得 $W = 5 \text{ W}$ 。

根据(10)、(11)式可得系统的跟踪俯仰角最大值 $\alpha_{\max} = -31^\circ$ 、最小值 $\alpha_{\min} = -40^\circ$;又根据(9)式,当跟踪俯仰角 $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$,组网天线的发射效率模拟曲线如图 8 所示。

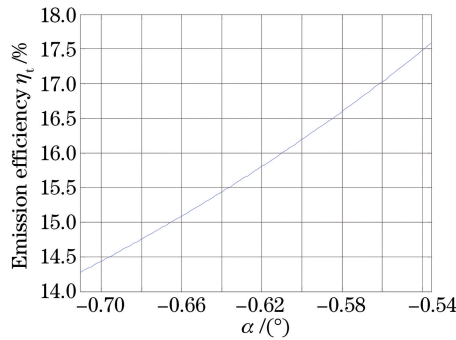


图 8 组网天线发射效率随跟踪俯仰角变化曲线

Fig. 8 Networking antenna emission efficiency versus tracking angle

由以上分析可知,当激光器发射能量为 5 W 时,三颗 LEO 卫星可以在 1000 km 范围内实现速率为 2.5 Gb/s 以上的双工通信。从图 8 可知此时组网通信天线系统的发射效率 $\eta_t \in [14.3\%, 17.6\%]$, 经计算其接收效率为 $\eta_r = 48\%$ 。

5 结 论

介绍了一种结构简单、易于轻小型化的新型激光通信组网光学天线系统,并对此系统的设计理论和工作原理进行了分析,进一步提出了该天线系统发射效率与接收效率的概念及指标算法。通过建立光学天线系统的通信发射模型,用数学解析的办法推导出组网天线系统能量发射效率、能量接收效率以及跟踪通信范围与旋转抛物面上下开口直径、焦距和透镜单元口径之间的函数关系,所得结论可为进行天线系统能量发射与接收效率分析和旋转抛物面的面形优化、透镜单元的口径优化等参数设计提供精确的理论依据。此外,得到了可通过增加旋转抛物面焦距、增大透镜单元口径等方法提高天线系统的接收与发射信号增益的结论。最后,基于三颗 LEO 卫星在 1000 km、动态通信俯仰角 20° 范围内以 2.5 Gb/s 以上速率进行组网通信的情况,求解得到此时可实现系统通信发射激光器的最小能量为 5 W,并且得出此时组网天线系统的能量发射效率处于 $[14.3\%, 17.6\%]$ 区间内,能量接收效率为 48%。本文所提出的系统,其旋转抛物面内部可形成中空结构,易于实现小型化、轻量化,且能在体积较小、重量较轻的情况下实现远距离、大范围的双工跟踪通信。对系统发射效率与接收效率的推导结论将推进激光通信技术在各种领域的工程化、规模化应用并可推动通信系统的跨代升级。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Space laser communication technology and system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 9-22.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 9-22.
- 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.
- Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505009.
赵 馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- Chu Xiuxiang. Research on propagation and transform of laser beams through relay mirror system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 68-75.
储修祥. 中继镜系统激光传输与变换的理论研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 68-75.
- Shen T C, Drost R J, Rzasa J, *et al.* Panoramic alignment system for optical wireless communication systems[C]. SPIE,

2015, 9354: 93540M.

- 7 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(8): 39-42.
刘宏展, 孙建锋, 刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. 光通信技术, 2010, 34(8): 39-42.
- 8 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 649-654.
佟首峰, 姜会林, 张立中. 高速空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 649-654.
- 9 Gurrieri L E, Dubois E. Acquisition of omnidirectional stereoscopic images and videos of dynamic scenes: a review[J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(3): 030902.
- 10 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.* Lunar laser communication demonstration in USA: terminal design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050003.
宋婷婷, 马 晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——终端设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050003.
- 11 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.* Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.
- 12 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Zhang Dongmei, *et al.* Networking technology of satellite laser communication platform [J]. Radio Communication, 2006, 10(4): 47-49.
李勇军, 赵尚弘, 张冬梅, 等. 空间编队卫星平台激光通信链路组网技术[J]. 无线电通信, 2006, 10(4): 47-49.