

空间激光通信组网中旋转抛物面基底面型研究

张雅琳¹ 安 岩^{1,2*} 王 超^{1,2} 江 轮^{1,2} 战俊彤¹ 刘显著¹ 姜会林^{1,2}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 旋转抛物面型多反射镜拼接结构的天线在空间激光多点间激光通信中有着重要的应用。选取不同的旋转抛物面基底面型,系统有不同的通信范围。针对作为基底的旋转抛物面面型进行研究,讨论了不同抛物线系数 p 与通信范围 θ 之间的关系,分析了不同有效口径下的通信范围,及其合理性。结果表明,在合理的取值范围下,抛物线系数 $p=28$ 时,最大通信角度可以达到 118.7377° ,但由于后续拼接反射镜的因素限制,得出合理选择抛物线系数 $p=50$ 时的面型,而此时通信范围为 109.8084° 。

关键字 光通信; 激光通信; 组网光学原理; 旋转抛物面; 基底面型

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0706003

Research on Rotating Paraboloid Based Surface in Space Laser Communication Network

Zhang Yalin¹ An Yan^{1,2} Wang Chao^{1,2} Jiang Lun^{1,2} Zhan Juntong¹

Liu Xianzhu¹ Jiang Huilin^{1,2}

¹School of Opto-Electronic Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Space Opto-Electronic Technology Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Rotating paraboloid mirror mosaic structure antenna has important applications in the multi-point space laser communication. Different rotating paraboloid base surfaces result in different communication ranges. The relationship between the parabola coefficient p and communication range θ with different effective apertures is discussed rationally. The results show that the maximum communication angle can achieve 118.7377° , where the parabola coefficient p is 28 in the reasonable range. However, because of restrictions coming from the following system, the surface need to be a reasonable choice that the parabola coefficient p is 50, and the maximum communication angle is 109.8084° .

Key words optical communications; laser communication; network optical principle; rotating paraboloid; base surfaces

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.1155

1 引 言

近年来关于空间激光通信技术的研究已成为热点^[1-4],利用激光通信组网能实现信息的有效利用、提高星间信道的可靠性、增大通信终端的通信覆盖范围、是未来卫星空间激光通信的发展趋势^[5-7]。空间激光通信组网的研究中^[8-11],以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构作为收发共用天线的方式,受到了广泛的关

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)、兵器研究基金(62201070152)

作者简介: 张雅琳(1987—),女,博士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: yalinjs@163.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、光电检测技术及激光通信方面的研究。

HLJian@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: anyan@163.com

注。本文主要对作为基底的旋转抛物面的面型进行了深入讨论与研究。

2 计算与分析

根据抛物面自身特性,即指向抛物面焦点的光线入射到其反射表面上,反射光线均平行于旋转轴(y轴),这个性质被很好地应用到了接收不同角度光束的天线中。作为基底的旋转抛物面面型如图1所示,假设抛物线方程为 $x^2 = 4py$, 其中 p 为抛物线系数, $F(0, p)$ 为抛物面的焦点。

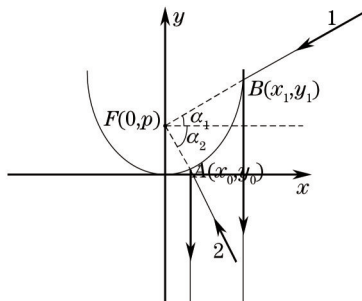


图1 旋转抛物面示意图

Fig.1 Picture of rotating paraboloid

当入射光线1指向焦点 $F(0, p)$ 时,入射光线1与抛物面的交点为 $B(x_1, y_1)$, 其反射光线与y轴平行,其延长线与y轴交点为 $F(0, p)$, 入射光线1与x轴的夹角为 α_1 ; 入射光线2与抛物面的交点为 $A(x_0, y_0)$, 其反射光线与y轴平行,其延长线与y轴焦点为 $F(0, p)$, 入射光线2与x轴的夹角为 α_2 , 抛物面天线通信范围即 $\theta = \alpha_1 - \alpha_2$ 。其中 α_1, α_2 是带有符号的角度, α_1 是正值, α_2 是负值。通信范围指经过抛物面焦点并经过面型反射后有效进入后续光路系统的光线角度范围。

从图2中可以看出, $\alpha_1 = \arctan\left(\frac{y_1 - p}{x_1}\right)$, $\alpha_2 = \arctan\left(\frac{y_0 - p}{x_0}\right)$, 因为抛物面表达式为 $x^2 = 4py$, 因此将 $y = \frac{x^2}{4p}$ 代入 α_1 和 α_2 表达式, 即得到通信角度范围 θ 。

$$\theta = \alpha_1 - \alpha_2 = \arctan\left(\frac{x_1 - p}{4p} - \frac{p}{x_1}\right) - \arctan\left(\frac{x_0 - p}{4p} - \frac{p}{x_0}\right). \quad (1)$$

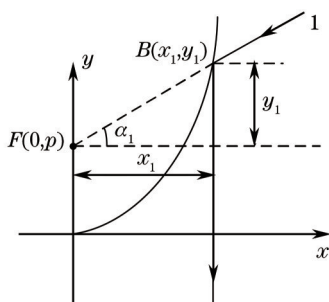


图2 角度关系示意图

Fig.2 Picture of the relationships between angles

如果取抛物面的全部, 即当 x_1 取无穷大, x_0 为0时, 代入(1)式中得到通信范围 $\theta = 90^\circ - (-90^\circ) = 180^\circ$ 。但是在实际使用时, 仅使用抛物面的一部分, 因此在实际使用时, x_0, x_1 为两个定量。

x_0 与 x_1 的取值代表取抛物面面型中的某一段, 即可用的有效面积, 如图1中的AB段。当 x_0 与 x_1 的取值不同的时候, 通信范围也不相同。通过计算, 可以得到 x_0 与 x_1 的取值、最大通信范围 θ 和最大通信范围下抛物线系数 p 值之间关系如表1和图3所示。

表1 x_0 与 x_1 取值、最大通信范围 θ 和最大通信范围下抛物线系数 p 值之间关系

Table 1 Relationships between x_0, x_1 , communication range θ and parabola coefficient p

$x_0, x_1 / \text{mm}$	$\theta / (^\circ)$	p
$x_0 = 5, x_1 = 190$	143.1301	16
$x_0 = 10, x_1 = 195$	128.9608	23
$x_0 = 15, x_1 = 200$	118.7277	28
$x_0 = 20, x_1 = 205$	110.6157	33
$x_0 = 25, x_1 = 210$	103.8544	37

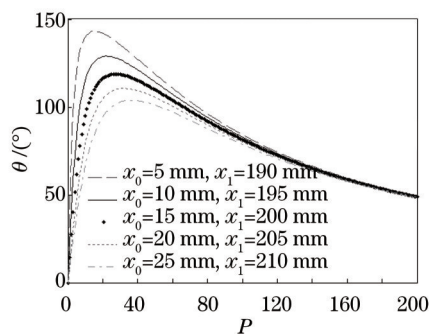


图3 不同 x_0, x_1 取值的通信范围

Fig.3 Communication ranges with different x_0, x_1

由图3可知,随着 x_0, x_1 覆盖的有效面积的漂移,通信范围也在逐渐变化。在有效面积大小一致的前提下, x_0 取值越低,通信范围越广。但是由于抛物面底部还有后续的光学系统,因此, x_0 不可无限减小。后续光学系统一般采用卡式系统,其主镜大小决定了 x_1 的大小,次镜大小决定了 x_0 的大小。由于考虑其合理性,选择 $x_0 = 15 \text{ mm}, x_1 = 200 \text{ mm}$ 时的结构进行进一步研究分析。

在 $x_0 = 15 \text{ mm}, x_1 = 200 \text{ mm}$ 的前提下,当抛物线方程 $x^2 = 4py$ 中抛物线系数 p 确定时,可根据 $\theta = \alpha_1 - \alpha_2 = \arctan\left(\frac{x_1 - p}{4p} - \frac{p}{x_1}\right) - \arctan\left(\frac{x_0 - p}{4p} - \frac{p}{x_0}\right)$,可以求出抛物面天线的通信角度范围。通信角度范围随 p 值变化曲线如图4所示。抛物线系数 $p = 28$ 时,最大通信角度 θ 可以达到 118.7377° ,此时抛物线的形状如图5所示。

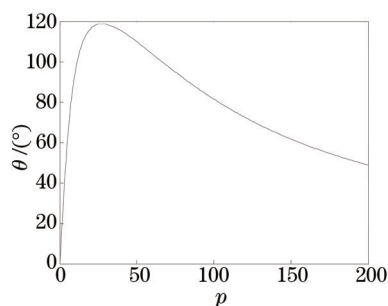


图4 通信角度随 p 值变化曲线

Fig.4 Variation of communication angle with p

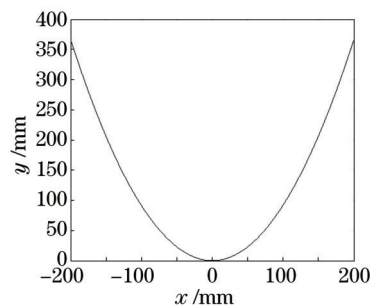


图5 当 $p = 28$ 时抛物线的形状

Fig.5 Paraboloid surface with $p = 28$

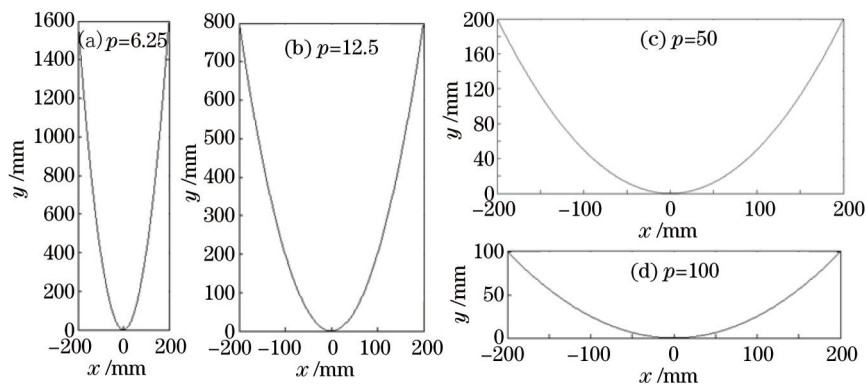


图6 当 $p = 6.25, 12.5, 50, 100$ 时抛物线的形状

Fig.6 Paraboloid surface with $p = 6.25, 12.5, 50, 100$

图6是当抛物线系数 p 分别为 $6.25, 12.5, 50, 100$ 时抛物线的形状,可以看出随着 p 值的增大,抛物线边缘的斜率从“陡”变为“缓”。其通信角度对应值如表2所示。

表2 抛物线系数 p 与通信角度范围 θ 对应表Table 2 Table of parabola coefficient p and communication range θ

Parameter	Value			
p	6.25	12.5	50	100
$\theta /(^{\circ})$	72.4585	103.8225	109.8084	81.4217

旋转抛物面直接应用具有局限性,因为只有通过焦点的一支光线可以平行于旋转轴平行出射,一个很好的应用是以抛物面做基底,利用反射镜拼接的方法来实现组网通信。在装调反射镜时,需要考虑反射镜的初始位置,如果使用抛物线系数 $p=28$ 的抛物面,装调时需使反射镜的初始位置角度为 61.27° ,很不方便。为此,较为合理的设计是使抛物面底面半径与高度相等,以使反射镜的初始位置角度为 45° ,此时抛物线系数 $p=50$,而通信范围 θ 为 109.8084° 与通信范围最大值($p=28$ 时)相差并不悬殊,因此,抛物面基底可采用 $p=50$ 时的面型。

3 结 论

分析了作为基底的旋转抛物面的面型结构,得出了抛物线系数 p 与通信范围 θ 之间的关系,对抛物面可利用面积进行了分析,取得了一个较合理的可利用面积。在此前提下,模拟仿真计算通信范围 θ 随 p 值变化曲线。分析得出最大通信范围是当抛物线系数 $p=28$ 时,通信角度可以达到 118.7377° 。但由于后续装调反射镜的因素限制,取得合理抛物线系数 p 值为 50 ,此时可通信范围为 109.8084° 。对多反射镜拼接结构的旋转抛物面基底面型所进行的合理分析与研究,对设计空间激光通信多点组网通信结构提供了一定的参考价值。利用选取的抛物面为基底的旋转抛物面结构对多点激光通信组网的发展起到了推动的作用。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[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.
- 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, 孙建峰, 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.
- 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. 高速率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.
- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 1-18.
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 1-18.
- Timothy E Busch, Paul J Oleski, Kevin W Dorrian, et al.. Overview of laser communication technologies at Rome laboratory[C]. SPIE, 1994, 2123: 24-33.
- Zheng Yang, Jiang Huilin, Thong Soufeng, 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. 基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706024.
- Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al.. Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on 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.
- 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.
- Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu, et al.. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 347-351.
许 楠, 刘立人, 万玲玉, 等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 347-351.

10 Jiang Huilin, Zhao Yiwu, Fu Qiang, et al.. Based on Multivariate Combination Rotating Parabolic Surface Type Structure of Point to Multi-Point Laser Communication Device: China, 201010199217.1[P]. 2010: 6-12.

姜会林, 赵义武, 付强, 等. 一种基于多元组合旋转抛物面面型结构的一点对多点激光通信装置: 中国, 201010199217.1[P]. 2010: 6-12.

11 Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan. Research on four-mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105002.

郑阳, 付跃刚, 胡源, 等. 基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105002.

栏目编辑: 王晓琰