

将成像光学系统用于激光发射的设计与分析

李艳杰^{1,2}, 金光¹, 钟兴¹, 刘春雨¹, 王天聪¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为减轻卫星载荷质量和应对各种突发状况, 将成像光学系统同时用作激光发射天线的共口径设计具有重要意义。因此根据特定的成像光学系统给出了共口径设计方法, 针对其中基于 EDFA 功放技术的发射单元与成像系统相匹配的耦合镜头进行了分析与设计, 基于此研究了发射高斯光束在该共口径系统中的传输及出射光束的场分布, 讨论并仿真分析了耦合镜头与成像主次镜距离的改变对出射光束性能的影响。结果表明, 共口径设计满足激光发射要求, 并且微调耦合镜头与成像主次镜的距离可以改变出射光束的束腰和远场光强峰值能量从而满足不同的通信需求, 且对出射光束的总能量没有明显影响。

关键词: 共口径光学系统; 激光发射; 空间成像; 耦合镜

中图分类号: O435.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3373-06

Design and analysis of using imaging optical system as laser transmitting antenna

Li Yanjie^{1,2}, Jin Guang¹, Zhong Xing¹, Liu Chunyu¹, Wang Tiancong¹

(1. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To alleviate the load of the satellite and to deal with sudden trouble, research of co-aperture designing methods with which the space imaging optical system can be used as laser transmitting antenna was important. First, the co-aperture design method was proposed based on a given imaging optical system, and the optical coupling elements for meeting the imaging system to the laser transmitting request was analyzed when the laser transmitting system was based on EDFA. Then, the Gauss beam transmitting through the co-aperture system was analyzed, and the field distribution was given. Finally, the effect of distance changing between the coupling elements and imaging system on the transmitted laser were simulated. Result show that the co-aperture design can satisfy the imaging and laser transmitting request, and slightly adjusting the distance between the coupling elements and imaging system can change the transmitted waist and far-field peak energy without bad effect on the total transmitting energy, which make it possible for the system to satisfy different communicating mission.

Key words: co-aperture optical system; laser transmitting; space imaging; coupling lens

收稿日期: 2015-03-21; 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 李艳杰(1988-), 女, 博士生, 主要从事光学系统设计、激光通信等方面的研究。Email: liyanjiework@126.com

导师简介: 金光(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星总体设计方面的研究。

0 引言

高分辨成像和高速对地通信是遥感卫星的必备功能。相对于成熟且广泛应用的射频空间通信系统,空间激光通信具有频带宽、光学增益大、功耗低、抗截获能力强的特点,已经成为未来星际、星地、空空、空地等链路通信发展方向之一^[1-3]。激光通信光学系统由主望远镜、中继光学组件以及发射、接收等子系统组成。对主望远镜,可以选择的光学系统形式有:卡塞格林系统加透镜、格里高利系统加透镜、离轴非球面反射系统和纯透镜系统等。现阶段的系统设计中多采用卡塞格林系统加透镜的形式,以便减小轴向尺寸,同时获得大的通光口径^[4]。空间遥感成像系统多采用同轴三反、离轴三反等形式光学系统,以满足对地高分辨率成像的要求。成像和通信光学系统在形式上有一定的共通部分,鉴于成像光学系统和激光通信光学系统将成为以后遥感卫星的必备载荷,考虑将二者进行共口径设计有重要意义^[4]——可以有效减轻卫星质量,此外,当发生突发状况使两光学系统有一者不能正常工作时,可以通过对另一个光学系统添加组件等形式的方法进行代替工作而不影响两者的性能。

现今对空间激光通信系统来说,同时提高调制速率与输出功率是通信发射单元的技术瓶颈,当调制速率大于 622 Mbps 时,其输出功率很难达到 W 量级。所以,将光纤通信领域业已成熟的 1 550 nm 波段的通信发射与探测技术引入空间激光通信领域已成为发展趋势^[5-6]。文中即考虑采用经 EDFA 放大后的光纤信号作为出射光源时的共口径形式的激光发射天线设计。

在参考文献[7]中提出一种同轴三反成像光学系统与收发合一激光通信天线共口径工作的光学系统设计结构,讨论了满足共口径的成像和通信系统设计方法。为应对激光数传系统的突发障碍,同时使共口径设计更有普适性,文中提出了将成像光学系统用作激光发射天线时的共口径设计,给出了使激光发射单元与成像主次镜相匹配的耦合镜设计方法,为兼顾不同的通信距离、跟踪精度需求,通过仿真分析,给出了使共口径系统满足不同发射角要求的方法,验证了共口径设计的可行性。

1 共口径设计

将成像光学系统用作激光发射天线时,一般保持前端大口径光学组件不变,在后端采取视场分光、分光片分光等形式进行共口径的设计。以空间遥感成像普遍使用的偏视场同轴三反光学系统为例,设计如图 1 所示的分视场共口径应用形式——利用成像光学系统的中心视场进行激光发射,将成像系统的主次镜作为发射系统天线,通过设计与主次镜匹配的耦合透镜,将激光信号发射出去(图 1 中沿光轴部分为发射单元,偏转光路部分为成像单元)。

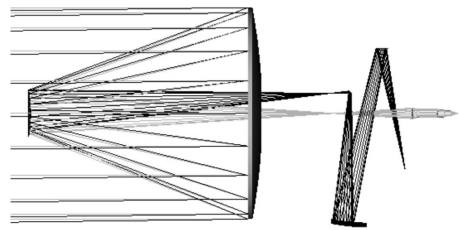


图 1 成像与激光发射共口径设计结构

Fig.1 Configuration of the co-aperture optical system

设计以 EDFA 放大后的光纤信号作为出射光源时的共口径形式的激光发射天线。光纤中光束一般先经过准直器准直,再经过耦合镜使光束与成像光学系统相匹配后发射,如图 2 所示。

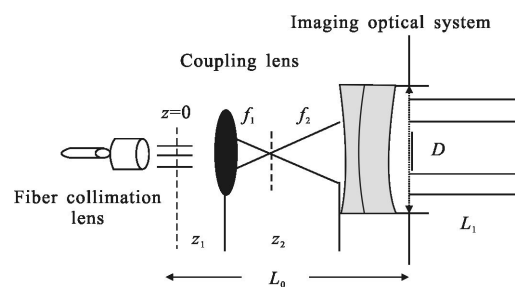


图 2 发射支系统

Fig.2 Subsystem for laser transmitting

由于空间激光通信链路距离长,要求通信激光在有限的辐射功率下,尽量压缩发散角,使之尽可能靠近发射终端的衍射极限值:

$$\theta_d = \frac{2.44\lambda}{D} \quad (1)$$

式中: D 为成像光学系统的口径。由光束发散角和束

腰的关系 $\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega}$ 可知,当 $\theta = \theta_d$ 时, $\omega = \frac{D}{1.22\pi}$, 即最终出射的光束束腰需要尽可能靠近该值。

已知经光纤准直器准直后的光束为柱坐标系下旋转对称的高斯光束,设束腰位置在 $z=0$ 处,束腰半径为 ω_0 ,在 $z=0$ 平面上的场分布为:

$$U_0(r_0, 0) = \exp(-r_0^2/\omega_0^2) \quad (2)$$

根据利用望远镜进行光束准直的原理^[8],可知最终成像光学系统出射的光束束腰大小为:

$$\omega' = \omega_0 M \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi \omega_0}\right)^2} \quad (3)$$

式中: $M = \frac{f_2}{f_1}$ 为成像光学系统与耦合镜的焦距比,即系统的准直倍率; z_1 为准直后束腰与耦合透镜的距离。

由公式(3)可知,可以通过提高系统的准直倍率来压缩高斯光束的发散角。但是当光斑等于或大于透镜的孔径时,出射光束的最小发散角由公式(1)决定。通过使 $\omega = \omega'$,可得耦合镜的焦距与成像系统焦距、系统口径、准直后的束腰及耦合透镜的距离之间的关系为:

$$f_1 = \frac{1.22\pi\omega f_2 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi \omega_0}\right)^2}}{D} \quad (4)$$

此外,根据参考文献[7],当成像系统的主次镜设计参数已知时,根据 PW 法,联合公式(4)可以求出耦合镜的初始结构。

2 发射光束在共口径系统中的传输

与成像光学系统不同,激光发射系统为能量发射系统,研究发射光束在系统中的传输以及出射光场的场分布对共口径设计具有重要意义。

为使问题简化,将成像光学系统简化为薄透镜和环形光阑的模型。整个激光发射系统如图 2 所示。

耦合镜的变换矩阵为: $M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix}$, 成像系统

变换矩阵为: $M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix}$ 。

光束从 $z=0$ 平面经自由空间 z_1 、耦合镜、自由空间 z_2 、光阑前的成像系统的变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M_1 \begin{bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设从 $z=0$ 面到光阑前的总长度为 L_0 ,根据 Collins 公式^[9],得到激光束经该光学系统后的场分布为:

$$U_1(r_1, L_0) = -\frac{ik}{2\pi B_1} \exp(ikL_0) \iint U_0(r_0, 0) \exp\left[-\frac{ik}{2B_1} * (A_1 r_0^2 - 2r_0 r_1 \cos(\theta_0 - \theta_1) + D_1 r_1^2)\right] r_0 dr_0 d\theta_0 = -\frac{ik}{B_1} \exp(ikL_0) \int U_0(r_0, 0) \exp\left[-\frac{ik}{2B_1} * (A_1 r_0^2 + D_1 r_1^2)\right] J_0\left(\frac{kr_0 r_1}{B_1}\right) r_0 dr_0 \quad (5)$$

利用指数函数的泰勒展开公式及贝塞尔函数相关公式:

$$J_0(lr) = \sum_0^{\infty} (-1)^m \left(\frac{l}{2}\right)^{2m} \frac{r^{2m}}{(m!)^2} \int_0^{+\infty} \exp(qr^2) r^{2m+1} dr = \frac{m!}{2(-q)^{m+1}} \sum_0^{\infty} \frac{x^n}{n!} = e^x$$

可得 $U_1(r_1, L_0)$ 的解析表达式:

$$U_1(r_1, L_0) = G \frac{1}{u} \exp\left(\frac{l^2}{4u}\right) \quad (6)$$

式中: $G = (ik/2B_1) \exp[ik(L_0 + D_1 r_1^2/2B_1)]$; $u = ikA_1/2B_1 - 1/\omega_0^2$; $l = kr_1/B_1$ 。

经过这样的内光路传输后,光束经环形光阑衍射,光阑的外半径为 a ,内半径为 b 。设光束自由传输 L_1 距离,该衍射空间的 ABCD 矩阵表示为:

$$M' = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

衍射光场分布为:

$$U_2(r_2, L_1) = -\frac{ik}{B_2} \exp\left[ik\left(L_1 + \frac{D_2 r_2^2}{2B_2}\right)\right] \int_b^a U_1(r_1, L_0) \exp\left(-\frac{ikA_2 r_1^2}{2B_2}\right) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B_2}\right) r_1 dr_1 = -\frac{ik}{B_2} \exp\left[ik\left(L_1 + \frac{D_2 r_2^2}{2B_2}\right)\right] \int_0^{\infty} H(r_1) U_1(r_1, L_0) \exp\left(-\frac{ikA_2 r_1^2}{2B_2}\right) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B_2}\right) r_1 dr_1 \quad (7)$$

式中: $H(r_1) = H_1(r_1) - H_2(r_1)$, $H(r_1) = \begin{cases} 0 & r > a \\ 1 & r_1 \leq a \end{cases}$, $H_2(r_1) =$

$\begin{cases} 0 & r_1 > b \\ 1 & r_1 \leq b \end{cases}$ 。

将圆孔函数展开为复高斯函数的叠加,即

$$H(r_1) = \sum_{n=1}^N A_n \exp\left(-\frac{B_n}{d^2} r_1^2\right)$$

式中: A_n 和 B_n 分别为展开系数和高斯系数, 可以由计算机优化得到, 当 $N=10$ 时, A_n 和 B_n 值可见参考文献[10]中表 1。利用以上公式得出经光阑衍射传输 L_1 距离后, 光场的分布为:

$$U_2(r_2, L_1) = Q \sum_{n=1}^{10} A_n \left[\frac{1}{p} \exp\left(\frac{r^2}{4p}\right) - \frac{1}{q} \exp\left(\frac{r^2}{4q}\right) \right] \quad (8)$$

式中: $Q = \frac{-k^2}{4B_1 B_2 u} \exp\left[ik \left(L_1 + L_0 + \frac{D_2 r_2^2}{2B_2} \right) \right]$; $p = \frac{ikA_2}{2B_2} + \frac{ikD_1}{2B_1} + \frac{k^2}{4uB_1^2} - \frac{B_n}{a^2}$; $q = \frac{ikA_2}{2B_2} + \frac{ikD_1}{2B_1} + \frac{k^2}{4uB_1^2} - \frac{B_n}{b^2}$; $t = \frac{kr_2}{B_2}$ 。

当已知准直镜、耦合镜及成像光学系统参数时, 根据公式(8), 可以计算出出射光场分布情况。

根据以上推导可知, 耦合镜、成像望远镜二者的距离 z_2 以及耦合镜的设计参数 M_1 可以影响输出光束的场分布, 从而影响出射束散角, 该影响需要进一步分析。

3 共口径系统实例设计与出射光场仿真

利用现有的成像光学系统, 设计如图 1 所示的共口径系统, 使之同时具备通信激光发射的功能, 并且出射光束束散角达到光学系统的衍射极限, 光学系统波像差 RMS 小于 $\lambda/2$ 。其中成像光学系统的和系统主次镜参数见表 1、表 2。系统一次成像焦距为

表 1 成像光学系统参数

Tab.1 Parameters of the imaging optical system

Parameter	Value
Pupil diameter/mm	480
Wavelength/nm	500-800
Focal length/mm	6 400
Vertical direction of orbit:	
Field of view	$2Tx=FOV=1^\circ$
Decline angle: $Ty=0.3^\circ$	

$f=3\ 560\text{ mm}$ 。因为成像和激光发射单元不同时工作, 由共口径系统的光路设计形式可知, 成像系统几乎

不受激光发射系统的影响, 只需在感光元件前加滤波元件即可。

表 2 主次镜参数

Tab.2 Parameters of the first and second mirror

	Radius/mm	Thickness /mm	Conic	Semi-diameter/mm
First lens	-1 273.66	-514.28	-0.988	240
Second lens	-298.65		-0.962	56.42

激光发射单元光纤准直镜参数已知, 见表 3。根据公式(4)得出耦合镜头设计焦距为 $f=99.44\text{ mm}$ 。结合主次镜参数, 根据 PW 法计算耦合镜的参数, 然后使用 ZEMAX 进行优化设计, 最终设计出图 1 所示共口径系统, 且耦合镜结构形式见图 3, 系统的波像差 RMS 为 0.0045λ 。

表 3 光纤准直镜参数

Tab.3 Parameters of the fiber collimating lens

Parameter	Value
NA	0.24
Focal length/mm	37.13
Full beam angle of divergence/($^\circ$)	0.016
Beam waist/mm	3.5

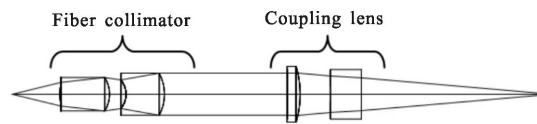
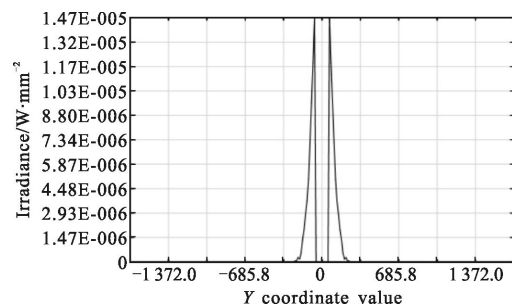


图 3 耦合镜头结构图

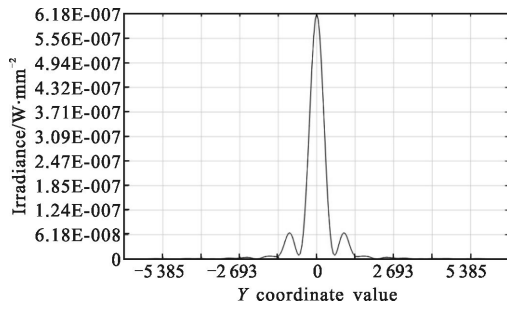
Fig.3 Configuration of the coupling optical lens

系统出射光束的近、远场光强分布如图 4 所示, 可以看出出射光束束腰大小为 124 mm , 可知束散角



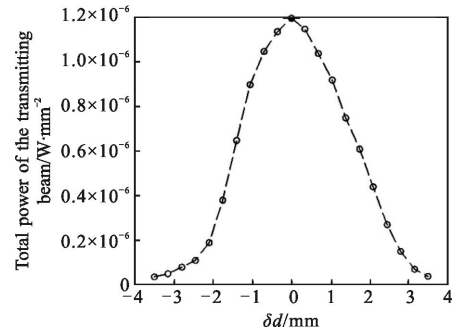
(a) 近场

(a) Near field



(b) 远场(100 km)

(b) Far field(100 km)



(b) 100 km 处的峰值光强

(b) Peak power of 100 km away from the system

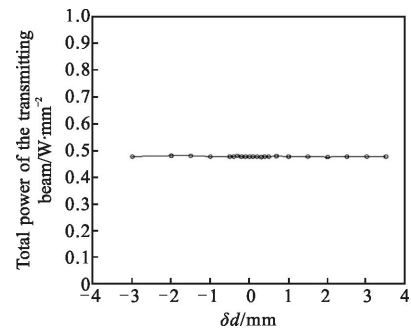
图 4 不同距离处垂直于光轴平面的光强分布

Fig.4 Power distribution on vertical receiver of the near and far field

达到了系统衍射极限,虽然近场中心光束被遮拦,但是远场光强能量仍相对集中在中心区域,所以该设计满足发射系统要求。

因为成像光学系统的口径较大,且在上述设计中指标达到了系统的衍射极限,因此系统的出射光束散角非常小。而在实际的空间激光通信中,通信束散角的大小受到动态跟踪误差的限制,当系统跟踪精度达到某个极限时,将对应一个最佳的通信束散角,而非束散角越小越好,因此研究通信束散角的调节具有重要意义。

结合第 2 节的理论分析,将成像主次镜看作前镜组,出射准直镜和耦合镜看做后镜组,微调前后镜组的距离,出射光束束腰、100 km 处的峰值能量以及出射总能量的变化如图 5 所示。结果表明,前后镜组距离的微调,可以改变出射光束的束腰(出射束散角)以及系统的峰值能量,而对出射总能量影响微弱。当通信系统对束散角的要求无须达到成像口径的衍射极限时,可以微调前后镜组的距离:当调节范围



(c) 出射总能量

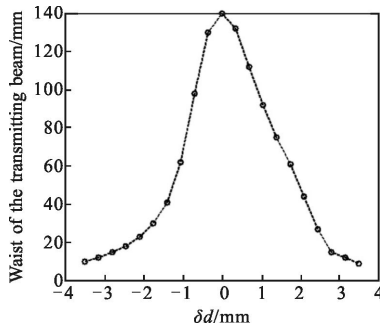
(c) Total transmitted power

图 5 出射光束相关参数随前后镜组间距离的改变

Fig.5 Characters of the transmitted beam vs distance between the front and back lens

在±1 mm 时,束腰在 40~140 mm 间变化,计算可得束散角的变化范围为 7~24.7 μrad,但是同时远场光束的峰值能量减小,即当接收面积一定时,接收到的总能量减小,此时可能需要增大接收系统的口径。

综上,微调前后镜组的距离可以在不影响出射光束总能量的情况下改变光束的束散角和峰值能量,从而使该共口径系统的通信发射单元适应不同的通信需求。



(a) 出射光束束腰

(a) Transmitted beam waist

4 结论

文中提出了将成像光学系统用作激光发射天线时的共口径设计方法,并对基于 EDFA 功放技术的发射系统中与成像光学系统相匹配的激光发射耦合光学元件的设计进行了指标分析;然后推导了发射高斯光束经该共口径系统后光束场分布表达式,为出射系统设计提供了理论基础;最后,对共口径系统进行了实例设计,仿真分析了出射光束经该光学系统后的场分布,以及改变包含耦合镜的后镜组与成

像主次镜的距离对出射光束束腰和能量的影响,结果显示,通过该距离的微调可以满足系统对束散角的不同要求,增加了系统通信的灵活性。通过文中的设计和分析,证实了将成像光学系统用作激光发射天线的可行性。

参考文献:

- [1] Jiang Huilin. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] Henniger H, Wilfert O. An introduction to free-space optical communications[J]. *Radio Engineering*, 2010, 19(2): 203–212.
- [3] Sun X L, Skillman D R, Hoffman E D. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar reconnaissance Orbiter in lunar orbit [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1865–1871.
- [4] Wei Qun, Ai Xingqiao. Development of small-scale and dual-field visible light optical system[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(4): 739–744. (in Chinese)
魏群, 艾兴乔. 小型可见光双视场光学系统的研制 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 739–744.
- [5] Tong Soufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 649–654. (in Chinese)
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.
- [6] Xiang Jinsong. Fiber coupled and optically preamplified satellite-to-ground bidirectional laser communication systems and its key technologies[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [7] Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, et al. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(8): 2067–2074. (in Chinese)
金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2067–2074.
- [8] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. The Laser Theory[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 第6版. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [9] Collins S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. *J Opt Soc Am A*, 1970, 60(9): 1168–1177.
- [10] Wen J J, Breazeale M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams [J]. *J Acoust Soc Am*, 1988, 83(5): 1752–1756.