

文章编号: 0258-7025(2009)03-0581-06

一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法

俞建杰 谭立英 马晶 韩琦琦 杨玉强 李密

(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 150080)

摘要 在采用同轴反射式光学天线的卫星光通信终端中,发射光束受天线次镜的遮挡,将损失部分能量。为消除次镜遮挡,提高光通信终端的发射效率,提出一种基于衍射光学元件的新方法。该方法利用衍射原理将光束整形为圆环光束,以规避次镜遮挡。按照遮挡比和切断比固定和变化这两类情况进行了仿真设计,前一类仿真结果表明:当遮挡比为 15,切断比为 1.5 时,远场强度峰值提高了 40%。后一类情况的仿真结果则表明:遮挡比越大,系统透过率和远场峰值强度越高,远场光束的主瓣宽度和强度峰值相对增量则分别变窄和变低;切断比越大,强度峰值的相对增量也越大。该方法提高了卫星光通信系统发射端的发射效率,同时也改善了接收端的光束质量。

关键词 光通信; 发射效率; 衍射光学元件; 光束整形

中图分类号 TN929 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0581

A Novel Method to Improve the Emission Efficiency of Satellite Optical Communication Terminal

Yu Jianjie Tan Liying Ma Jing Han Qiqi Yang Yuqiang Li Mi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract In satellite optical communication transmitter with reflective telescope of two-mirror on axis, a large amount of the transmitted energy will be obscured by the secondary mirror. A novel method based on diffractive optical elements (DOE) is proposed for offsetting it. The beam centrally obscured is reshaped to annulus beam by a diffractive beam shaper and another phase corrector, as a result central obscuration is avoided. Numerical simulation is carried out with fixed obscuration ratio and truncation ratio, and variation of them, respectively. Subsequent numerical simulation reveals that peak energy of far field is raised about forty percent under the condition of obscuration ratio is 15, and truncation ratio is 1.5. And numerical modelling of the latter are as follows: the larger obscuration ratio, the larger transmission efficiency of whole system and peak energy of the far field, the narrower the width of main lobe of far field pattern, and the lower relative increment of peak energy; The larger truncation ratio, the larger relative increment of peak energy of beam in far field. This work can improve the emission efficiency of transmitter and energy density of receiver plane in satellite optical communication system.

Key words optical communication; emission efficiency; diffractive optical elements (DOE); beam shaping

1 引言

卫星光通信是以激光为信息载体在卫星间或卫星和地面间进行高速通信的一种新型通信方式,是光通信技术在卫星应用领域的拓展,也是现代卫星通信领域的重要研究方向^[1~6]。光学天线是卫星光通信终端的重要组成部分,一般使用于收发共用的卫星光通信终端,是发射光路和接收光路的共有部件。

卫星光通信系统中,为获得极窄的光束发散角

并减小光终端体积,一般采用同轴两镜式反射望远镜为光学天线^[7~9]。该结构的主要缺点是次镜遮挡造成的光能损耗较大,致使光通信终端的发射效率较低。为弥补这一损耗,提高发射效率,传统的解决方法是提高发射激光器的输出功率,但这种方法将使终端的功耗增加,从而对卫星平台的能源分配造成压力。其他的解决方式包括旋转三棱镜^[10]、双次镜^[11]、锥面反射镜^[12]及离轴三反镜^[13,14]等,但这些

收稿日期:2008-08-16; 收到修改稿日期:2008-10-22

基金项目:哈尔滨工业大学优秀团队支持计划。

作者简介:俞建杰(1980—),男,博士研究生,主要从事衍射光学元件设计方面的研究。E-mail: yjjhit@163.com

导师简介:谭立英(1957—),女,教授,主要从事卫星光通信和小波光学等方面的研究。

方法大多存在整形效率不高、系统体积庞大或装调困难等缺点,不能很好地满足实际空间系统需求。因此,如何在增加终端功耗和体积等前提下,消除次镜遮挡导致的能量损失成为该领域的研究热点之一。衍射光学元件的出现为该问题的解决带来了转机,利用衍射光学元件能完成任意波形的变换,实现传统折反射光学元件不能实现的特殊功能^[15]。如果能用衍射光学元件将实心的输入光束转换成环形光束^[16,17]后再输入至光学天线,就能使光束在传输中绕过次镜的遮挡,从而减小甚至消除次镜遮挡带

来的能量损失,有效提高光通信终端的发射效率。

本文采用相位恢复算法设计了能消除次镜遮挡的衍射光学元件,并比较了不同遮挡比和切断比条件下,设计前后的输出光束在远场的能量分布变化。

2 基本装置

基于衍射光学元件的卫星光通信终端发射光束能量增益技术基本装置主要包括:激光光源、准直透镜、衍射光学整形器件、衍射光学相位校正器件、反射式光学天线。该装置的基本工作原理如图1所示。

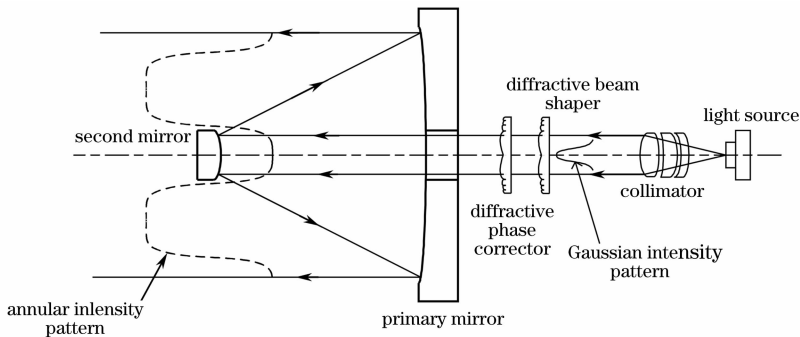


图1 实现发射能量增益提升的工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram for realizing energy gain-boosting

在图1中,激光光源输出的光束经准直透镜组准直后,以准平行光的方式入射至衍射光学整形器件,此时光束能量分布为圆形高斯分布。该光束经特殊设计的衍射光学整形器件进行波前整形后,能量分布变换为环形分布。环形光束经光学天线倍率放大后,其输出光束能量分布仍为环形分布(为简单起见,假设经光学天线后的环形光束与入射至光学天线的环形光束存在简单的倍率放大关系,实际设计需考虑反射镜面的面型和光束发散角等多种因素)。当内环直径大于光学天线次镜直径,由于次镜不再对输出光束起遮挡作用,因此输出光束总能量和光通信终端的发射效率必然同时提高。光束整形过程未对输出面光波的相位作任何要求和限制,整形后的光波场将偏离理想波面,因此还需在光束整形器的谱面处特别设置一个相位校正器件修正相位,以保证光束仍能按要求的光束发散角入射至光学天线。

完成振幅分布由高斯分布到环形分布的变换。

高斯光束转换成环形光束的光学系统可参考图2。衍射光学元件置于输入平面P1处,输入平面和输出平面P2之间的距离为傅里叶变换透镜的焦距 L ,考虑一维情况(其结果可直接推广至二维情况),则输入面振幅分布和输出面振幅分布之间满足以下关系:

$$E_{\text{out}}(r_2) = H(r_1, r_2) \{E_{\text{in}}(r_1)\}, \quad (1)$$

$$\text{其中 } E_{\text{in}}(r_1) = A(r_1) \exp[i\varphi(r_1)], \quad (2)$$

$$E_{\text{out}}(r_2) = B(r_2) \exp[i\psi(r_2)], \quad (3)$$

(1)式中的 $H(r_1, r_2)$ 为光学传递函数,它是能实现光束振幅分布从 $A(r_1)$ 到 $B(r_2)$ 的某种变换,例如傅里叶变换、分数傅里叶变换、汉克尔变换等。

(1)式在数学上属于反衍射问题,其解的存在性和唯一性仍有待于证明,一般将其转换为优化问题近似求解^[18]。用于解决式(1)的优化算法即为衍射光学元件的设计方法,它包含局部搜索和全局搜索两大类算法^[19~26],其中最著名的算法当属盖师贝格-撒克斯通(GS)算法。GS算法是利用输入面和其傅里叶频谱面上的已知振幅信息 $A(r_1)$ 和 $B(r_2)$,通过引入振幅限制,反复迭代后得到输入面上的相位分布 $\varphi(r_1)$,使(1)式成立,具有编程简单、收敛速度快和通用性强等特点,本文将采用GS算法设计衍射光学光束整形器件。

3 衍射光学元件的设计原理

实现图1所示装置的关键是衍射光学整形器件和衍射光学相位校正器件的设计,两者都属于衍射光学元件。由于相位校正器件不改变光束振幅,设计相对简单,因此在本文中衍射光学元件的设计主要是指衍射光学整形器件的设计,该器件的作用是

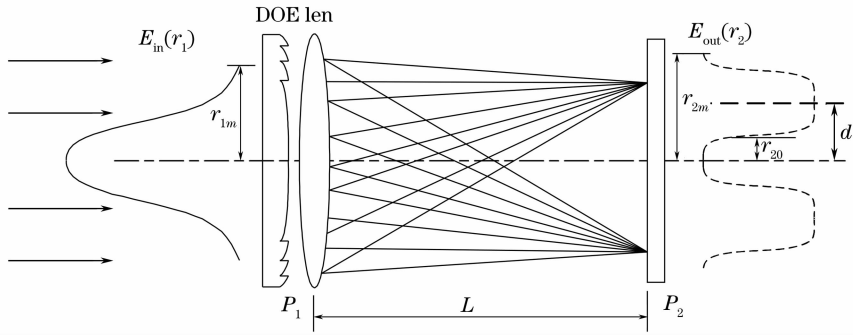


图 2 高斯光束到环形光束的变换示意图

Fig. 2 Schematic plan from Gaussian beams to annular beams

为使光学系统传输效率最大化,假设全过程没有能量损失,因此输入和输出面之间存在能量守恒关系,即

$$\int_0^{r_{1m}} A^2(r_1) r_1 dr_1 = c \int_{r_{20}}^{r_{2m}} B^2(r_2) r_2 dr_2, \quad (4)$$

式中 $A(r_1)$ 为基模高斯分布; $B(r_2)$ 为环形均匀分布,即圆环上各点振幅相等。 r_{1m} 为输入光束的最大半径, r_{20} 为输出光束的内环半径, r_{2m} 为最大外环半径,它们之间满足以下关系:

$$r_{1m} = r_{2m}, \quad \frac{r_{2m}}{r_{20}} = \frac{D_1}{D_2} = M, \quad (5)$$

其中, D_1, D_2 分别为光学望远镜主镜和次镜的直径, M 表示光学望远镜的放大倍率。

(4) 式中的 c 为常数。实际设计中,首先利用能量守恒关系确定常数 c ,之后即可利用 GS 算法进行相位分布函数的迭代计算。

4 数值仿真

由于利用衍射光学元件进行光束整形的过程中没有能量损耗,因此对比整形前后,卫星光通信终端发射效率的提高以及光束总能量的提升都是显而易见的结果。然而,对于整个卫星光通信链路来说,最重要的是卫星光通信接收端的光束质量是否有所改善。为考察整形前后卫星光通信接收端的光束质量变化,采用能量峰值相对增量 η 表征接收端光束质量的改善程度。 η 定义为整形前和整形后的近场(即光发射机所在平面)光束在远场(即光接收机所在平面)的能量峰值的相对增量。

在光通信发射端,光学天线的遮挡比和光束的切断比都将对输出光束的形状造成一定影响,因此有必要讨论光束远场分布随遮挡比和切断比的变化。文中定义遮挡比 M 为主次镜口径之比,切断比 σ 为输入光半口径 r_{1m} 与高斯光束束腰 ω_0 之比。

仿真设计中,衍射光学元件的输入振幅函数为基模高斯光束:

$$A(r_1) = \exp(-2r_1^2/\omega_0^2), \quad (6)$$

式中 ω_0 为输入高斯光束的束腰。

要求输出的振幅分布为环形均匀分布(均匀分布采用巴特沃斯函数近似逼近):

$$B(r_2) = \left\{ \frac{1}{1 + [(r_2 - d)/\omega_c]^{2N}} \right\}^{1/2} + \left\{ \frac{1}{1 + [(r_2 + d)/\omega_c]^{2N}} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

式中 ω_c 为巴特沃斯分布的截止半径, N 为巴特沃斯分布的阶数, d 为巴特沃斯分布的对称轴与系统光轴之间的距离。

光波波长 $\lambda = 830 \text{ nm}$, $r_{1m} = 5 \text{ mm}$, $r_{2m} = 5 \text{ mm}$, $r_{20} = r_{2m}/M$, $d = (r_{2m} + r_{20})/2$, $\omega_c = 0.8(r_{2m} - r_{20})/2$, $N = 10$; 输入面和输出面采样间隔均为 513。

4.1 遮挡比和切断比固定时的设计

取遮挡比 $M = 15$, 切断比 $\sigma = 1.5$, 并定义衍射光学元件设计算法的评价函数为

$$f_{\text{SSE}} = \frac{\int ||H\{E_{\text{in}}\} - B|^2 dr_2}{\int |B|^2 dr_2}. \quad (8)$$

当 GS 算法收敛时,相应的输出强度分布如图 3

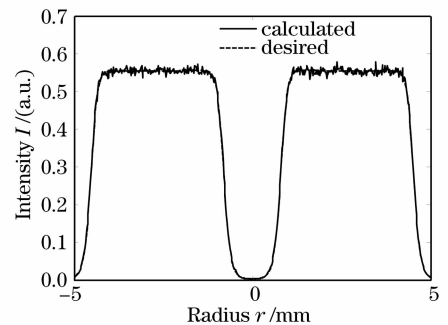


图 3 整形后的光束强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of beams after beam shaping

所示。重构得到的强度分布与目标强度分布基本吻合。相应的衍射光学整形器件的相位分布如图 4(a)

所示(8 阶量化结果),相位校正器件的相位分布如图 4(b)所示(8 阶量化结果)。

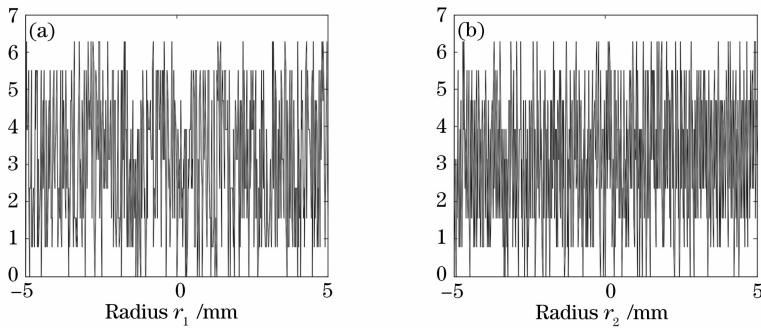


图 4 衍射光学元件的相位量化分布,量化阶数为 8。(a)衍射光学整形器件;(b)衍射光学相位校正器

Fig. 4 Quantized phase distributions of DOEs. (a) DOE for beam shaping, $n=8$; (b) DOE for phase correction, $n=8$

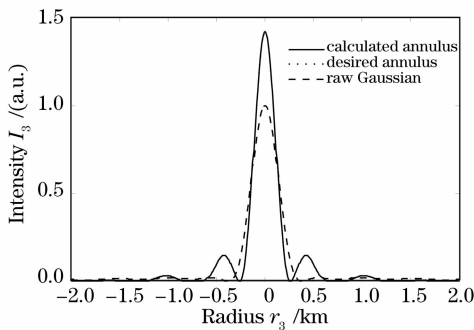


图 5 远场光束强度分布

Fig. 5 Intensity distribution of beams in the far field

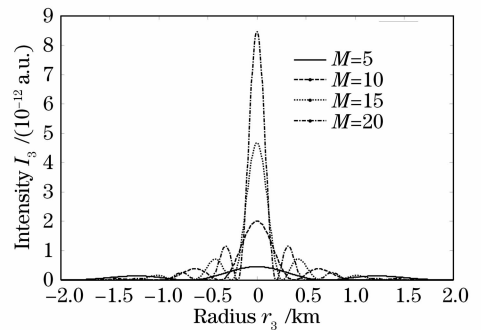


图 6 远场绝对强度分布随遮挡比的变化

Fig. 6 Relation between absolute intensity distribution in the far field and obscuration ratio

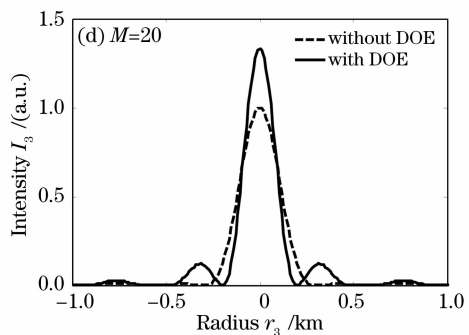
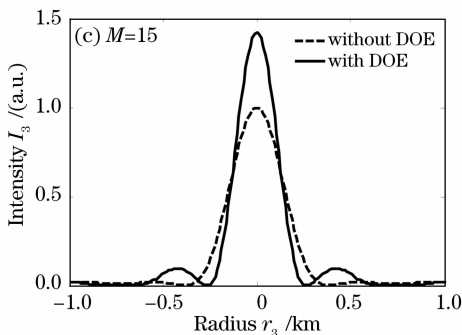
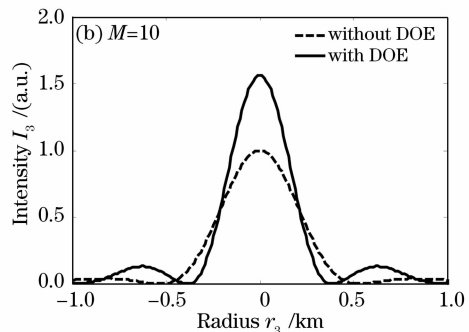
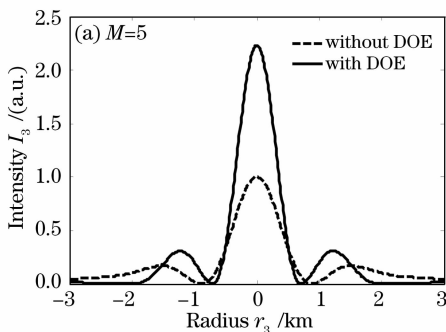


图 7 远场相对强度分布随遮挡比的变化

Fig. 7 Relation between relative intensity distribution in the far field and obscuration ratio

图 5 描述了光束在自由空间传播 5 万公里后的远场强度分布。整形后的光束与受次镜遮挡的高斯光束相比, η 提高了 41.9%, 主瓣内的光功率密度也大幅上升, 这说明光束整形处理极大地提升了发射能量增益。但整形后的旁瓣能量较大, 需进一步抑制。理想的环形光束与重构的环形光束在远场的强度分布重合程度非常高, 说明当算法收敛以后, 重构输出光束的振幅微扰对远场强度分布的影响非常小。

4.2 遮挡比与远场分布的关系

当遮挡比 M 不同时, 设计结果将发生变化, 保持其他参数不变, 取切断比 $\sigma=1.5$, 考察 M 变化时的远场强度分布。

图 6 为整形后的光束在远场的绝对强度分布随遮挡比的变化情况。由图可知, 随着 M 的增加, 远场光束强度分布的主瓣变窄, 强度峰值变大, 总能量逐渐增加。

图 7 为遮挡比变化时, 受遮挡的高斯光束和整形后的环形光束的远场相对强度分布的相应变化。由图可知, 随着 M 的增加, η 逐渐减小, 当 M 为 5, 10, 15, 20 时, 相应的 η 分别为 117.8%, 55.0%, 41.6%, 32.9%。

4.3 切断比与远场分布的关系

当切断比 σ 不同时, 设计结果也将发生变化, 保

持其他参数不变, 取遮挡比 $M=10$, 考察 σ 变化时的远场强度分布。

图 8 是整形后的光束在远场的绝对强度分布随切断比的变化情况。由图可知, 随着 σ 的增加, 整个远场光束强度分布整体降低, 总能量随之减小, 但各个极值点的位置保持不变。

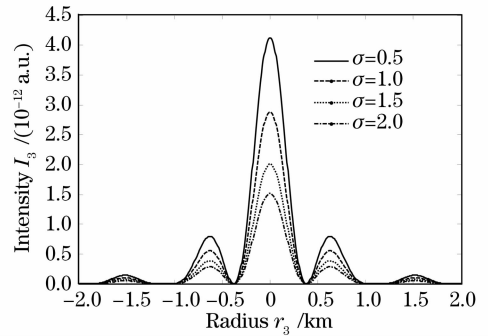


图 8 远场绝对强度分布随切断比的变化
Fig. 8 Relation between absolute intensity distribution in the far field and truncation ratio

图 9 为切断比变化时, 受遮挡的高斯光束和整形后的环形光束的远场相对强度分布的相应变化。由图可知, 随着 σ 的增加, 远场能量峰值相对增量 η 亦逐渐增加, 当 σ 为 0.5, 1, 1.5, 2 时, 相应的 η 分别为 5.1%, 18.6%, 55.8%, 122.9%。

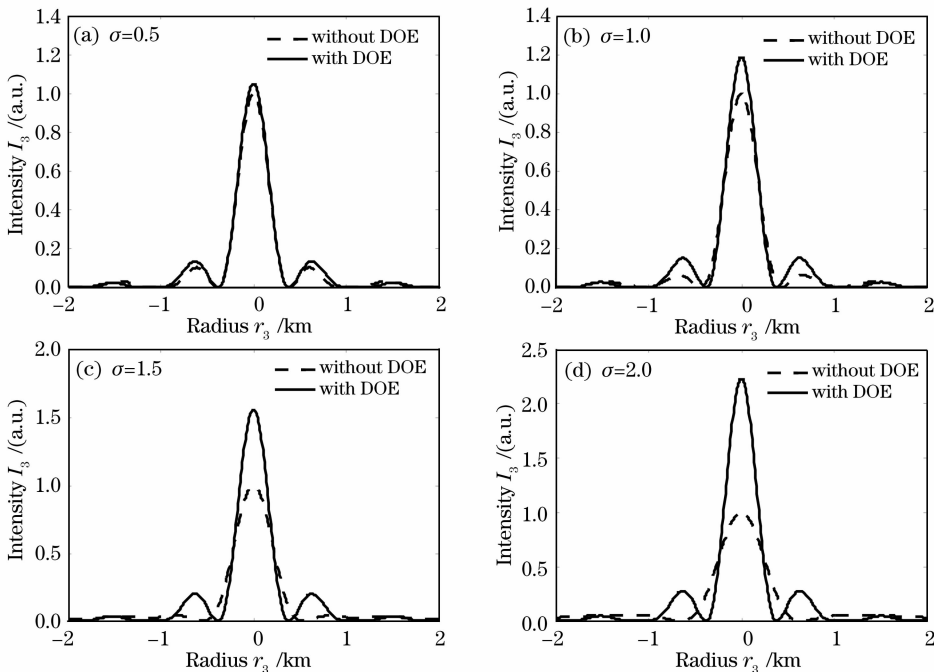


图 9 远场相对强度分布随切断比的变化

Fig. 9 Relation between relative intensity distribution in the far field and truncation ratio

5 结 论

提出了一种包含两个衍射光学元件的卫星光通信终端光束整形装置。该装置通过将实心高斯光束转变为中空圆环光束的方式,规避了次镜遮挡引起的能量损失,从而使发射效率大幅提升,其理论传输效率可达100%。由于该方法不要求额外的功率补给,且放置于光轴方向的衍射光学元件属轻薄器件,同时它们均不偏折光轴,因此有理由认为该方法的实现是建立在光通信终端的功耗、重量和体积均保持不变的基础上。讨论了遮挡比和切断比均固定时的衍射光学整形器件的设计,仿真结果表明整形后光束远场分布的主瓣能量密度大幅上升,其能量峰值提高了40%左右。而遮挡比和切断比变化时的仿真结果则表明:遮挡比越小,切断比越大,衍射光学元件对系统提升的作用就越强;适当选取遮挡比和切断比,有利于光学天线参数的优化选择。本文所提出的方法虽然在实际应用中仍可能存在许多不足,但衍射光学元件的引入提供了一种新的思路,其设计经验可应用于其它许多领域。

参 考 文 献

- G. Oppenhausser, M. Wittig, A. Popescu. The european SILEX project and other advanced concepts for optical space communications[C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 2~13
- T. T. Nielsen, G. Oppenhausser. In orbit test result of an operational intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 1~15
- T. Jono, Y. Takayama, N. Kura *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 610503
- Tan Liying, Ma Jing. The Technology of Intersatellite Optical Communications[M]. Beijing: Science Press, 2004
谭立英,马晶. 卫星光通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1~30
- Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
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): 3~20
- Liu Liren. Laser communications in space II: test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155
刘立人. 卫星激光通信 II: 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 147~155
- A. Yamamoto, T. Hori, T. Shimizu *et al.*. Japanese first optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS)[C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 30~38
- H. Hemmati, N. A. Page. Preliminary opto-mechanical design for the X2000 transceiver[C]. *SPIE*, 1999, **3615**: 206~211
- M. Knappek, J. Horwath, N. Perlot *et al.*. The DLR ground station in the optical payload experiment (STROPEX)—results

- of the atmospheric measurement instruments[C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63041U
- W. N. Peters, A. M. Ledger. Techniques for matching laser TEM₀₀ mode to obstructed circular aperture[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1435~1442
- O. D. Christy. Dual-secondary mirror Cassegrain optical syetem [P]. U. S. Patent: 4,439,012, 1984-03-27
- Kong Xianglei, Hao Peiming. New method to remove central shade for reflecting laser beam expander[J]. *Chin. J. Quantum Electron.*, 2002, **19**(3): 205~209
孔祥雷,郝沛明. 消除中心遮挡的反射式激光扩束新方案[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(3): 205~209
- C. W. Chen. Re-imaging optical system including refractive and diffractive optical elements[P]. U. S. Patent: 5,287,218, 1994-02-15
- R. N. Smartt, E. W. Cross. Advances in spherical-mirror telescopic systems design: application to large-aperture solar coronagraphs[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 2055~2058
- W. B. Veldkamp, T. J. McHugh. Binary optics[J]. *Scientific American*, 1992, **266**(5): 92~97
- Gao Huide, Li Qi, Dong Yunhua *et al.*. Study on binary optical element for Gaussian beam shaping to thick annulus[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(3): 184~186
高惠德,李琦,董蕴华等. 高斯光束转换成厚环形光束的二元光学元件的研究[J]. 光电子·激光, 1998, **9**(3): 184~186
- Lü Junfeng, Zhang Jingjuan, Zhang Yan *et al.*. Design of a ring-beam profile converter with the SA-BIWP hybrid algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 85~89
吕俊峰,张静娟,张艳等. 用SA-BIWP混合算法设计三维圆环光束的BOE[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 85~89
- Jin Guofan, Tan Qiaofeng. Binary optics[J]. *Opto. Technol. Information*, 2001, **14**(5): 1~10
金国藩,谭峭峰. 二元光学[J]. 光电子技术与信息, 2001, **14**(5): 1~10
- R. W. Gerchberg, W. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane picture [J]. *Optik*, 1972, **35**: 237~246
- J. R. Fienup. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(1): 27~29
- J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi *et al.*. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~679
- Mahalb U, Shamir J, Caulfield H J. Genetic algorithm for optical pattern recognition[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9): 648~650
- Yang Guozhen, Wang Li, Dong Bizhen *et al.*. On the amplitude-phase retrieval problem in an optical system involved non-unitary transformation[J]. *Optik*, 1987, **75**(2): 68~74
- Liu Bohan, Wu Liying, Zhang Jian. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 219~224
刘伯哈,吴丽莹,张健. 一种用于衍射光学元件优化设计的快速算法的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 219~224
- Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682~1686
林勇,胡家升,吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1682~1686