

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706002

基于轴锥镜对的高光能利用率激光通信天线性能分析

刘显著^{1,2}, 王超¹, 李英超¹, 江伦¹, 刘壮¹, 姜会林¹, 杨进华²

(1 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, 长春 130022)

(2 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:提出一种增加轴锥镜对的同轴反射式光学结构激光发射天线方案,通过对入射光束的光强重新排布,降低同轴反射式结构固有的中心遮拦造成的能量损失,提高光能利用率.运用衍射光学原理分析并模拟了单色高斯光束经过轴锥镜对后传播至天线光阑平面处的光场分布,比较了普通同轴反射式天线和高光能利用率天线在不同入射光束腰半径、不同线遮拦比下的发射光能利用率.结果表明:高光能利用率天线在线遮拦比 0.1 和 0.25 的情况下,通过合理调整入射光束腰大小,光能利用率分别可达到 99% 和 96% 以上,远高于传统的同轴反射式天线.分析了高光能利用率天线发射光束的远场光强分布,发现其进入接收天线口径内的光场可近似为平顶分布.

关键词:激光通信;高光能利用率;衍射光学;光学天线;轴锥镜;激光传播;遮拦比

中图分类号:

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)07-0706002-7

Analysis of Performance of High Light-energy-utilization-ratio Laser Communication Antenna Based on Axicon Pair

LIU Xian-zhu^{1,2}, WANG Chao¹, LI Ying-chao¹, JIANG Lun¹, LIU Zhuang¹, JIANG Hui-lin¹, YANG Jin-hua²

(1 Key Laboratory of Education Ministry Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

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

Abstract: A scheme of coaxial reflective laser communication antenna added an axicon pair was proposed. This antenna could rearrange the light intensity distribution of the incident beam, leading to a great reduction of the energy loss caused by the central obscuration of the coaxial reflective structure and an increasing of the light-energy-utilization-ratio. Using the diffraction optical principle, the optical field distribution of the monochromatic Gaussian beam propagating to the antenna optical stop plane passed the axicon pair was analyzed and simulated, and the transmitting light energy utilization ratios of the ordinary coaxial reflective antenna and the high light-energy-utilization-ratio antenna in different incident beam waist and line obscuration ratios were compared. It was found that at the line obscuration ratio of 0.1 and 0.25, the light-energy-utilization-ratios of the high light-energy-utilization-ratio antenna were more than 99% and 96% through adjusting the incident beam waist diameter reasonably, which were much highest than that of the traditional coaxial reflective antenna. The far-field optical intensity of the light-energy-utilization-ratio antenna transmitting beam was analyzed, and the the light intensity in the receiving antenna aperture can be considered as a flat top distribution.

Key words: Laser communication; High light-energy-utilization-ratio; Diffractive optics; Antenna; axicon; Laser propagation; Obscuration ratio

OCIS Codes: 060.4510; 060.2605; 200.2605

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 60907020, 91338116, 91438204)、吉林省教育厅基金(No. [2016]369)和长春理工大学自然科学基金青年基金(No. WQNJ-2016-15)资助

第一作者:刘显著(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为光学设计、高速空间激光通信技术. Email: liuxianzhu@cust.edu.cn

通讯作者:王超(1986-),女,讲师,博士,主要研究方向为空间光通信中的光学系统设计. Email: nicklo1992009@163.com

导师:杨进华(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为图像处理技术. Email: yangjh@cust.edu.cn

收稿日期:2017-03-10; **录用日期:**2017-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

与微波通信相比,自由空间激光通信具有速率高、功耗低、通信终端体积小、重量轻、抗干扰性能强和保密性高等优点,近年来受到人们的密切关注^[1-4]. 光学天线是激光通信系统发射和接收光信号的关键装置,其设计将直接影响整个激光通信系统的性能^[5]. 受到搭载平台如卫星、飞机等的限制,激光通信终端能够获得的资源有限,因此需要尽可能提高激光通信天线的发射和接收效率^[6].

目前,大口径激光通信天线往往采用同轴反射式光学结构,该结构具有中心遮拦,将导致发射和接收光能量的损失,当发射光束采用光强呈高斯分布的激光束时,这种损耗将更为严重^[5]. 目前已有研究者对此问题提出解决办法,如俞建杰等利用位相板型衍射光学元件,将激光高斯光束整形为中空光束,从而防止中心拦光^[7]. 但纯位相型衍射元件制造较为困难,公差要求严格,且元件衍射效率较低,本身也会造成一定的光能损失. 而降低中心遮拦造成的影响,其核心问题在于将入射高斯波或平面波的光能量重新排布,使用轴锥镜也可以达到这一效果. 以往轴锥镜主要用于产生贝塞尔光束和无衍射光束^[8],广泛应用于光学谐振器^[9]、位移测量仪^[10]、直线度测量仪^[11]和激光三角测量仪^[12]等. 丁志华等利用不同形状的双锥镜进行光强分布转换从而实现变迹型光学超分辨,指出双轴锥镜可能实现中心低周围高的能量分布,但仅从几何光学的角度出发分析光强转换过程,未考虑衍射效应对出射光场造成的影响^[13]. 因此,要使双轴锥镜应用于同轴反射式激光通信天线从而提高天线发射效率,仍需对高斯光束通过双轴锥镜的过程建立更为贴近实际的理论模型.

本文提出一种利用轴锥镜对和同轴反射式光学结构相结合的高光能利用率激光天线,可抑制结构中中心遮拦造成的能量损耗. 运用衍射光学原理分析模拟了单色高斯光束经过轴锥镜对后传播至天线光阑平面处的光场分布,比较了一般同轴反射式天线和高光能利用率天线在不同线遮拦比下的发射光能量利用率,研究了入射光束腰大小对能量利用率的影响,并分析了高光能利用率天线发射光束的远场光强分布.

1 单色高斯光束正入射双轴锥镜的衍射效应

一个典型高光能利用率激光通信天线的结构如图 1. 从激光发射路径来看,激光束在激光装置内部被准直后依次穿过凸轴锥镜对和同轴反射式扩束系统,该同轴反射式结构一般采用两反射镜光学结构,其中次镜造成中心遮拦,将损失部分光能. 准直的激光高斯光束入射至轴锥镜对第一块锥镜的前表面处,经锥镜对变换后,原中心峰值部分将从第二块轴锥镜底面的边缘附近出射,原边缘部分将从第二块轴锥镜底面最靠近中心的部分出射,如图 2 所示. 为实现光线重新排列,两个轴锥镜应光轴重合且相对放置. 若要使入射光束的边缘光线经第一块轴锥镜转换并出射后,其与主光轴的交点刚好与第二块锥镜相重合,则轴锥镜的几何参数和两轴锥镜之间的距离应满足^[13]

$$\frac{z}{d} = \tan \theta + \cot [\arcsin (n \sin \theta) - \theta] \quad (1)$$

式中 z 是两轴锥镜顶点之间的距离, d 是第一块轴锥镜底部的半径, θ 为轴锥镜的锥角, n 是轴锥镜的折射率,此时光线入射高度 r 和出射高度 r_1 满足 $r + r_1 = d$. 为了简化问题,轴锥镜对之后的同轴反射系统的扩束倍率视为 1,并抽象为一个有中心遮挡的环形光阑,其与第二块轴锥镜的距离为 l ,如图 2.

利用衍射光学原理,可以求出 TEM₀₀ 模高斯光束经过两相对的轴锥镜后的衍射光场分布. 正入射到第一轴锥镜前表面的高斯光束场强可表示为^[14]

$$U_0(r) = C \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \quad (2)$$

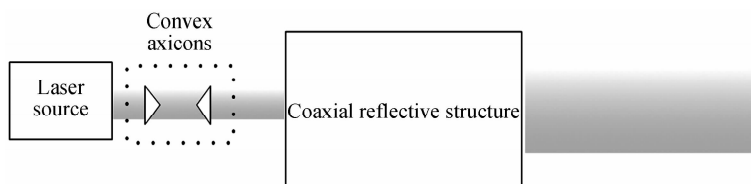


图 1 高光能利用率激光通信天线示意图

Fig. 1 Diagram of high LEUR laser communication antenna

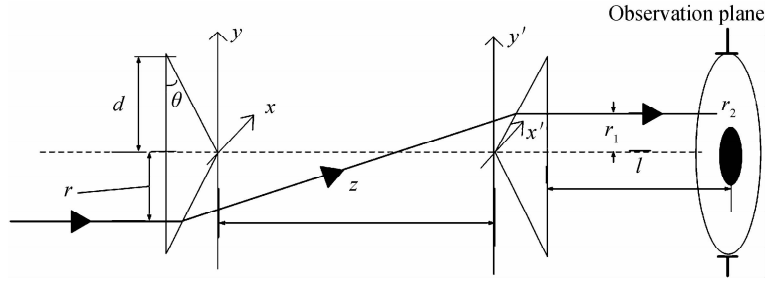


图2 通过双轴锥镜变换后的光线示意图

Fig.2 Diagram of the rays transformation by convex axicons

式中 r 为入射光线的垂轴高度, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, w_0 是高斯光束的束腰半径, C 为常数系数.

为便于分析,在轴锥镜锥角不太大的情况下,可将轴锥镜作为透明薄位相板处理,其透射相位函数可写为^[15]

$$t(r) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)r\theta] & (r \leq d) \\ 0 & (r > d) \end{cases} \quad (3)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, n 为轴锥镜折射率, θ 为轴锥镜锥角. 则在紧贴第一个轴锥镜后表面的孔径平面,光场复振幅分布可表示为

$$U(r) = U_0(r)t(r) \quad (4)$$

根据惠更斯-菲涅尔衍射原理,光束传播至第二轴锥镜前表面所在的平面时,光场分布可写作

$$E_z(x', y') = \frac{C \exp(ikz)}{i\lambda z} \iint U(x, y) \exp\{i \frac{k}{2z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\} dx dy \quad (5)$$

考虑到入射光束为圆对称分布,式(5)可改写为极坐标形式,即

$$E_z(r_1) = \frac{Ck \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right)}{iz} \int_0^d J_0\left(\frac{kr r_1}{z}\right) \exp\{ik\left[\frac{r^2}{2z} - (n-1)r\theta\right] - \frac{r^2}{w_0^2}\} r dr \quad (6)$$

式中 $r_1 = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, $J_0(x)$ 表示零阶贝塞尔函数.

光束再次经过与第一轴锥镜方向相反的第二轴锥镜后,由于转 180° 后轴锥镜的透射函数并不随方向而改变,此时出射光场可表示为

$$E_1(r_1) = E_z(r_1)t(r_1) \quad (7)$$

光场再次经过 l 的衍射距离后传播至光阑前表面,可表示为

$$E(r_2) = \frac{k \exp(ikl) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2l}\right)}{iz} \int_0^d E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{l}\right) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2l}\right) r_1 dr_1 \quad (8)$$

则光束能量分布可表示为

$$I_t(r_2) = |E(r_2)|^2 \quad (9)$$

假定转换器件没有能量吸收,并忽略表面反射导致的损耗. 则根据能量守恒定律,光能在被轴锥镜对变换前后应满足

$$\int_0^d 2\pi r dr I_0(r) = \int_0^\infty 2\pi r_2 dr_2 I_t(r_2) \quad (10)$$

式中 $I_0(r) = |U_0(r)|^2$.

光束透过光阑后,最终光能分布为

$$I(r_2) = I_t(r_2)P(r_2) \quad (11)$$

式中 P 为光阑透过率函数,可表示为

$$P(x) = \begin{cases} 1 & a \leq x \leq d \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (12)$$

式中 a 为中心遮拦半径. 而对于未使用轴锥镜对的普通光学天线,入射激光束传播至光阑时可表示为

$$E'(r_2) = \frac{Ck \exp[ik(z+l)] \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2(z+l)}\right]}{iz} \int_0^d J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z+l}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2(z+l)} - \frac{r_1^2}{\omega_0^2}\right] r_1 dr_1 \quad (13)$$

最终通过光阑后光强为

$$I'(r_2) = |E'(r_2)|^2 P(r_2) \quad (14)$$

2 数值分析与讨论

接下来利用数值仿真的方式对单色高斯光束入射轴锥镜对并传播至光阑面处,但尚未通过光阑的光强分布进行模拟. 相应的参数设置为:两个轴锥镜完全相同,镜体底面的光学口径半径为 5 mm,锥角为 5° ,波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,光阑与第二块轴锥镜 l 的距离 = 100 mm. 分别对高斯光束的束腰半径 $\omega_0 = 1 \text{ mm}$ 、2 mm 和 3 mm 三种情况进行分析. 根据式(1)~(8)可分别计算出三种束腰大小时,有和无轴锥镜情况下距起始点距离为 $(z+l)$ 的归一化光强径向分布,如图 3.

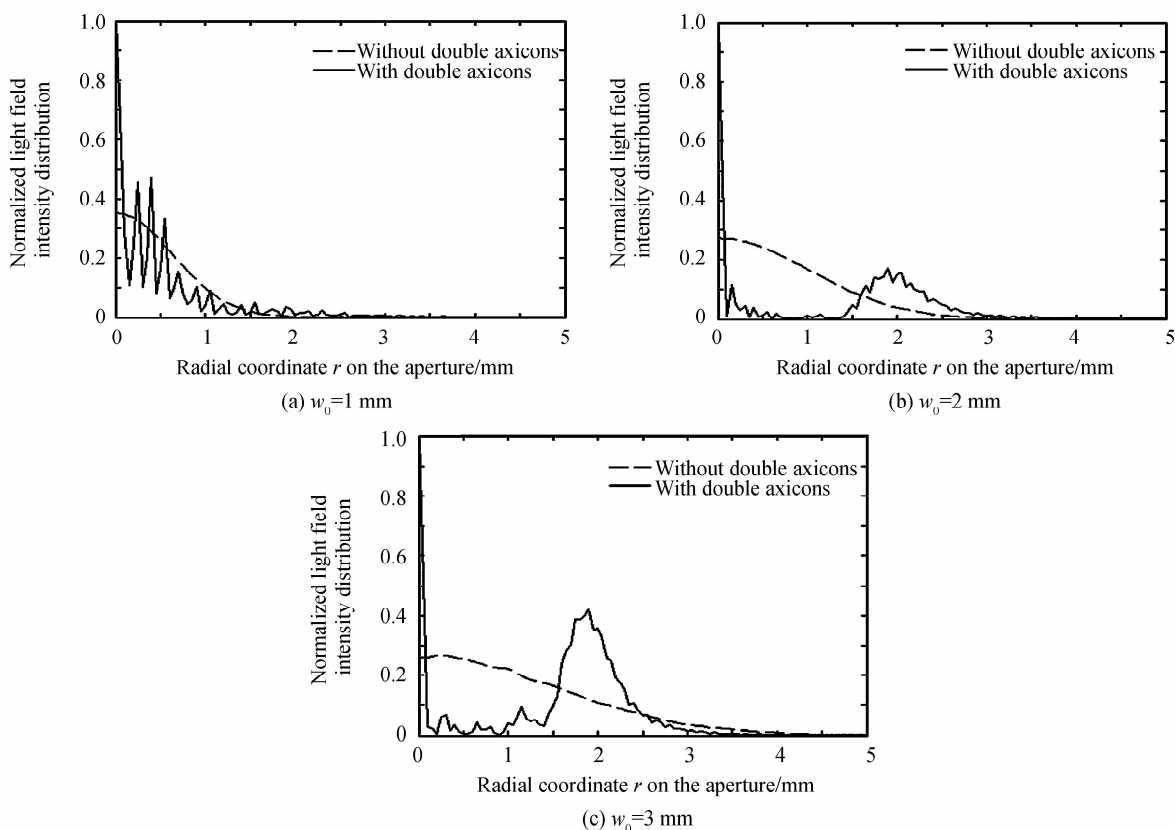


图 3 有和无轴锥镜的情况下观察面上的归一化光强径向分布

Fig. 3 Normalized light intensity radial distribution with and without axicons

由图 3 可知,对任一种束腰半径的情况,对于普通光学天线和高光能利用率天线,观察平面上的光强在孔径边缘($r_2 = 5 \text{ mm}$)处均已基本下降至 0. 因此在计算观察面上的总光功率时可将计算区域限制为整个通光孔径,忽略径向坐标大于通光孔径半径的光线能量. 对于经传统光学天线变换的光束,传播到孔径光阑处光强仍接近高斯分布,随径向坐标逐渐降低. 而对于经过含轴锥镜对的高光能利用率天线的光束,光场在中心处均有一很窄的尖峰. 当 $\omega_0 = 1 \text{ mm}$ 时,光强分布随径向坐标呈高频振荡形式,其外包络线为一随径向坐标迅速下降,径向坐标大于 4 mm 时已与横坐标重合的曲线. 可见此时的光能主要集中在孔径中心部分,一旦有中心遮拦,仍会损失大部能量. 当 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 时,光能分布经过中心尖峰后迅速下降,在接近于 0 的高度起伏. 随着光线径向坐标增加到 1.5 mm 以上,光强开始上升至最高点,之后单调下降,到孔径边缘时已趋近于 0. 此时的光线接近中空光束. 当 $\omega_0 = 3 \text{ mm}$ 时,光能仍基本呈中心有一峰值,之后下降至较低值,径向坐标增大到一定程度又上升的状态,但与 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 时相比,中心部分能量占总能量较多,有中心遮拦后可能会损失更多的光能.

接下来分析在相同遮拦比下的标准同轴反射式天线和增加轴锥镜对的天线的能量利用率.对含轴锥镜对的高能量利用率光学天线而言,假设遮拦的半径为 a ,则光能利用率可以表示为

$$\eta = \frac{I}{I_0} = \frac{\iint_{s_1(a \leq x \leq d)} I(x) ds_1}{\iint_{s(0 \leq x \leq d)} I(x) ds} \quad (15)$$

式中 s 为忽略中心遮拦的整个孔径, s_1 为有中心遮拦时的环形孔径.

对于普通同轴反射式天线,只需将式(15)中的 $I(x)$ 替换为 $I'(x)$ 即可.表 1 给出了这两种天线在不同线遮拦比,不同入射高斯光束束腰 ω_0 条件下的能量利用率.

表 1 两种天线在不同遮拦比下的光能利用率
Table 1 LEURs of the two antennas for different line obscuration ratio

Line obscuration ratio	$\omega_0 = 1 \text{ mm}$		$\omega_0 = 2 \text{ mm}$		$\omega_0 = 3 \text{ mm}$	
	Coaxial reflective antenna/%	High LEUR antenna/%	Coaxial reflective antenna/%	High LEUR antenna/%	Coaxial reflective antenna/%	High LEUR antenna/%
0.1	70.69	76.55	87.57	98.2	94.06	99.21
0.125	61.14	68.61	80.29	97.84	90.38	99.07
0.18	34.01	53.84	66.2	97.48	82.75	98.41
0.2	26.59	51.68	60.25	97.19	79.16	97.98
0.25	12.88	44.06	45.66	96.43	69.7	95.18

由表 1 可知,对于一般的同轴反射式天线,无论线遮拦比大小,增加初始入射光束的束腰半径可以大幅提高光能利用率.当入射光束腰半径一定时,同等遮拦比下高光能利用率天线造成的能量损失总是小于普通的同轴反射式天线,遮拦比越大,高光能利用率天线的优势越明显,以 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 为例,线遮拦比 0.25 时,普通同轴反射式天线光能利用率已下降至 45.66%,而高光能利用率天线高达 96.43%.固定线遮拦比的情况下,使用高光能利用率天线,调整入射光束腰大小可获得最佳光能利用率.例如在线遮拦比为 0.1 时, ω_0 为 3 mm 获得最高能量利用率,高于 99%.而遮拦比 0.25 时, ω_0 为 2mm 可获得最高能量利用率,高于 96%.

在文献[7]中,采用在同轴反射式天线之前加入纯位相型衍射元件的光学结构,将高斯光束整形为中空光束,从而减少能量损失.据文中所述,在不考虑材料本身吸收损耗和制造时二元光学位相板的有限台阶数近似误差的前提下,该方法在天线遮拦比分别为 0.1 和 0.125 时,光能利用 τ_0 各达到 99.62%和 99.45%.而文中采用的位相衍射元件量化台阶数为 16 阶,其最高衍射效率 τ_1 能够达到 98.7%^[16].因此,最终加入位相板的天线的光能利用率的计算公式为: $\tau = \tau_0 \tau_1$.则可得到两种光学结构在相同中心遮拦比下各自的能量利用率,如表 2.

表 2 两种光学结构的能量利用率
Table 2 LEURs of the two optical structures

Line obscuration ratio	Based on phase plate/%	Based on axicon pairs, $\omega_0 = 3 \text{ mm}/\%$
0.1	98.32	99.21
0.125	98.15	99.07

由表 2 可知相同遮拦比下,基于轴锥镜对的新型光学天线的能量利用率高于基于位相板衍射元件的光学天线.且位相板元件表面为微浮雕型精细结构,其位相分布设计较为复杂,往往需利用算法寻找最优解,且位相板加工造价较高,公差要求也较为严格.

激光束经天线发射到达接收终端时通常已经传播了数千甚至上万公里,因此,有必要研究一般同轴反射式天线和含轴锥镜的高光能利用率天线的远场光强分布.高光能利用率天线发出的光束的远场复振幅可以通过 Fraunhofer 衍射公式计算^[14],即

$$U(r', z') = \frac{\exp(ikz') \exp(i \frac{kr'^2}{2z'})}{i\lambda z'} \cdot 2\pi \int_a^d E(r_2) P(r_2) J_0(\frac{kr_2 r'}{z'}) r_2 dr_2 \quad (16)$$

式中 z' 为传播距离, r' 为远场接收平面上的径向坐标.同理,将式(16)中的 $E(r_2)$ 为 $E'(r_2)$ 可得到普通同轴反射式天线的远场复振幅.当 $z' = 10\ 000 \text{ km}$ 时,不同天线在不同入射光束腰半径条件下的归一化远场光强

分布如图 4 所示. 考虑到遮拦比越大越可能对远场光场造成影响, 遮拦比均取 0.25.

由图 4 可知, 从 25 m 半径的尺度来看, 标准同轴反射式天线的远场光强比高光能利用率天线更接近平顶分布. 但由于整体体积约束, 接收天线的通光半口径一般不大于 0.5 m, 观察图 4, 此时高光能利用率天线接收到的光能在口径内可认为是均匀的. 因此在天线内加入轴锥镜对时, 远场接收口径范围内接收的光波可视为平面波, 该结论与使用普通激光发射天线时的情况相同.

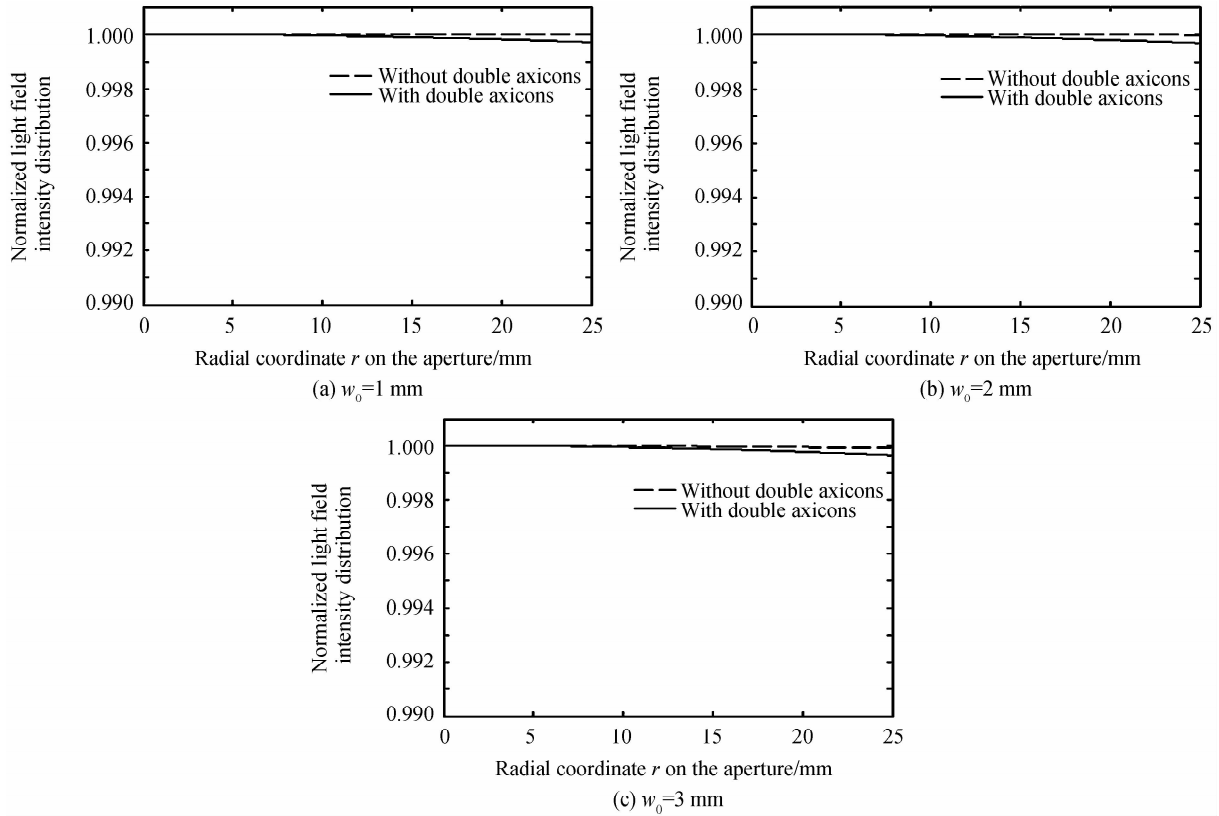


图 4 同轴反射式天线和高光能利用率天线的归一化远场光强分布

Fig. 4 Normalized far-field optical intensity distribution for coaxial reflective and high LEUR antennas

3 结论

本文提出一种有效提高激光通信天线光能利用率的方法, 通过将传统的同轴反射式天线和轴锥镜相结合, 重新分配入射单色高斯光束的能量, 从而获得类空心光束, 大大降低天线中心遮拦造成的光能损失. 利用衍射光学公式分析模拟了在不同入射高斯光束束腰半径条件下, 基于轴锥镜对的高光能利用率天线光阑面处的光场能量分布, 给出了不同遮拦比下该种新型天线的能量利用率. 当入射光束束腰半径一定时, 同等遮拦比下高光能利用率天线造成的能量损失总是小于普通的同轴反射式天线, 遮拦比越大, 高光能利用率天线的优势越明显; 固定遮拦比的情况下, 使用高光能利用率天线并调整入射光束束腰大小可获得最佳光能利用率. 高光能利用率天线发出的光束经过上万公里传播后, 在远场接收天线有效口径内的光场可近似为平面波. 与使用位相型衍射元件与同轴反射式天线结合的方法相比, 这种方法使用的轴锥镜容易加工, 且元件本身透射效率高, 额外光能损失小, 具有很好的应用价值.

参考文献

- [1] ALONSO A, REYES M, SODNIK Z. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station[C]. SPIE, 2004, 5572: 372-383.
- [2] MARSHALEK R G, MECHERLE G S, JORDAN P R. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links[C]. SPIE, 1996, 2699: 134-145.
- [3] KE Xi-zheng, LI Shi-yan. Experimental study on optical axis alignment of the optical antenna under the spot broken[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0406002.
柯熙政, 李世艳. 光斑缺碎情形下光学天线光轴对准实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0406002.

- [4] LIU Peng, WANG Xiao-man, HAN Cheng, *et al.* Simulation of acquisition subsystem in space-ground optical communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0206004.
刘鹏, 王晓曼, 韩成, 等. 空地激光通信系统中捕获子系统仿真[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 0206004.
- [5] TAN Li-ying, MA Jing. Satellite optical communication technology[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.
- [6] DUCHMANN O, PLANCHE G. How to meet intersatellite links mission requirements by an adequate optical terminal design[C]. SPIE, 1991, 1417:30-41.
- [7] YU Jian-jie. Research on the optical design and performance evaluation methods of the optical system in inter-satellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009:37-62.
俞建杰. 卫星光通信光学系统优化设计及性能评测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009:37-62.
- [8] ZHAO Qiu-ling, WU Fu-quan. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8):1121-1123.
赵秋玲, 吴福全. 光相位延迟量的归一化偏振调制测量[J]. 光学学报, 1997, **17**(8):1121-1123.
- [9] APFEL J H. Graphical method to design multilayer phase retarders[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(6):1024-1029.
- [10] HOWLADER, M M K, AZZAM, R M A. Periodic and quasi periodic nonquarterwave multilayer coatings for 90° reflection phase retardance at 45° angle of incidence[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(5):869-875.
- [11] NAGIB N N, E-BAHRAWY M S. Phase retarders with variable angles of total internal reflection[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(6):1218-1122.
- [12] LU Feng-huang. Design and performance analysis of laser triangulation optical system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011:11-24.
卢凤凰. 激光三角测量光学系统设计及性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011:11-24.
- [13] DING Zhi-hua, TIAN Wei-jian, BAO Zheng-kang. Superresolution with high throughput via irradiance redistribution element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5):701-706.
丁志华, 田维坚, 包正康. 利用光强分布转换器件实现低能耗光学超分辨[J]. 光学学报, 2000, **20**(5): 701-706.
- [14] YU Dao-ying, TAN Heng-ying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] WANG Chao, JIANG Lun, DONG Ke-yan, *et al.* Research of far-field divergence for collimated gaussian beam diffracted by a circular aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11):1105001.
王超, 江伦, 董科研, 等. 准直圆孔衍射高斯光束远场发散度研究[J]. 光子学报, 2015, **44**(11):1105001.
- [16] XU Bing. Investigation of phase encoding and fabrication processing of beam shaping element[D]. Suzhou: Soochow University, 2004:18-19.
徐兵. 光束整形器的位相编码与制作工艺研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2004:18-19.