

中继镜系统作用效果与上行链路望远镜口径关系分析*

吴慧云, 吴武明, 许晓军, 陈金宝, 赵伊君
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:建立了中继镜系统模型, 计算了 30km 高度中继镜系统作用效果与上行链路望远镜口径的关系, 结果显示: 当望远镜口径低于 0.42m 时, 系统作用效果随着望远镜口径增大而显著提升; 在 0.42 ~ 0.54m 范围内, 系统作用效果随着上行链路望远镜口径增大而显著降低; 当望远镜口径大于 0.54m 时, 系统作用效果随着上行链路望远镜口径的增加而增加, 但增加的幅度逐步降低, 当望远镜口径增加到一定大小后, 系统作用效果趋向于稳定值, 望远镜口径的增加对系统作用效果不具有提升作用。分析了系统作用效果在 0.42 ~ 0.54m 范围内出现突降的原因, 计算结果显示: 上行接收光束强度不均匀性导致二次光源光束质量的急剧下降, 进而降低了系统作用效果。文章的计算结果为中继镜系统参数设置提供参考。

关键词: 中继镜系统; 作用效果; 上行传输

中图分类号: O43 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)01-0028-05

Analysis of the relationships between system damage effect and the uplink telescope aperture in a relay mirror system

WU Huiyun, WU Wuming, XU Xiaojun, CHEN Jinbao, ZHAO Yijun

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Model of a relay mirror system was established, and the relationships between system damage effect and the uplink telescope aperture in a 30km-altitude relay mirror system were calculated. Results show that, with the increase of the uplink telescope aperture, the system damage effect increases significantly when the uplink telescope aperture is less than 0.42m; the system damage effect decreases sharply when the uplink telescope aperture is in 0.42 - 0.54m; the system damage effect increases when the uplink telescope aperture is greater than 0.54m, while gradient of the increasing reduces; the system damage effect tends to be a stable value when the telescope aperture is greater than a certain size. Reasons for the steep fall in 0.42 - 0.54m are analyzed, and it is demonstrated that the intensity non-uniformity of the received beam causes the reduction of the new source beam quality and the steep fall of the system damage effect. The results of the study can provide reference for the relay mirror system.

Key words: relay mirror system; damage effect; uplink propagation

激光中继镜技术是近年来备受各方瞩目一项新型激光系统作战概念^[1-7]。中继镜系统革命性地将光源与光束控制部分分离, 能降低大气等因素对激光的影响、拓宽激光系统的作战范围, 被认为是机载激光和地基激光的威力倍增器, 并冠名为“革命性航空和航天全球激光交战系统”^[8-9]。美国自“星球大战”计划以来, 一直致力于中继镜技术的研究并取得了一系列的进展^[9-13]。目前, 美国军队转型办公室已把中继镜技术作为美军的转型技术, 中继镜技术的发展必将影响到未来一代的高能激光系统。

中继镜系统主要由光源、上行发射与接收系

统、中继平台、校正与净化系统、下行发射系统和相关的通信设备组成。在上行链路中, 中继镜系统通常采用双望远镜结构, 用以实现光束的发射与接收。上行链路是中继镜系统工作的基础, 望远镜口径设置对上行链路性能具有决定性的影响, 合理的望远镜参数设置是中继镜技术研究的重要内容。本文建立了中继镜系统模型并详细分析了中继镜系统作用效果与上行链路望远镜口径的关系, 为中继镜系统望远镜参数设置提供参考。

* 收稿日期: 2011-09-01

基金项目: 湖南省研究生科研创新资助项目(CX2011B031); 国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B110701)

作者简介: 吴慧云(1984-), 男, 浙江衢州人, 博士研究生, E-mail: huiyun-wu@163.com;

陈金宝(通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com

1 模型建立及理论分析

1.1 模型建立

中继镜系统模型如图 1 所示,其主要工作过程为:系统向位于高空的中继平台发射激光束,光束经接收、校正与净化后作为新光源,由下行望远镜将光束重定向聚焦到目标上,实现对目标的打击^[10]。中继镜系统光路如图 2 所示,系统包含有两套自适应系统:一套位于地表,主要用于上行传输过程大气扰动的校正;另一套位于中继平台上,主要用于上行接收光束的校正与净化。上行链路中,系统具有完全合作信标,通过使用高精度自适应系统,大气扰动可以得到有效的校正,闭环工作时,上行传输可近似为真空传输^[10,14]。

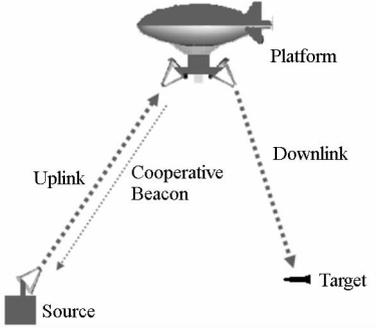


图 1 中继镜系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a relay mirror system

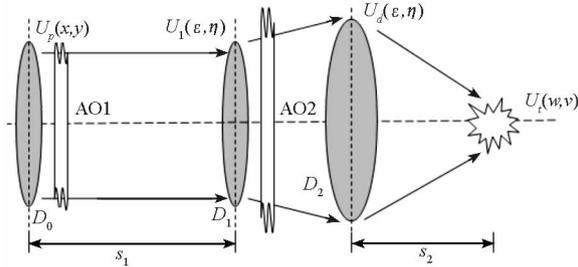


图 2 中继镜系统光路图

Fig. 2 Optical path in a relay mirror system

1.2 理论分析

1.2.1 二次光源分析

中继镜系统中,上行接收光束经相位校正后作为下行传输的新光源,上行链路对系统后续作用效果的影响是通过二次光源体现的。对二次光源性能的评价主要包括两方面:一是功率大小;二是光束质量。

1) 功率

由惠更斯-菲涅耳衍射公式,上行接收光场分布可表示为^[15]

$$U_1(\epsilon, \eta) = \frac{e^{jks_1}}{j\lambda s_1} \iint U_p(x, y) e^{i\frac{k}{2s_1}[(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2]} dx dy \quad (1)$$

$$I_1(\epsilon, \eta) = U_1(\epsilon, \eta) U_1(\epsilon, \eta)^* \quad (2)$$

其中, \$U_p(x, y)\$ 为光源光场分布, \$I_1(\epsilon, \eta)\$ 为接收光场强度分布, \$s_1\$ 为上行传输距离, * 代表取复共轭。在中继镜系统中,上行光束经望远镜接收后进行光束净化,作为新光源下行传输,新光源的功率可表示为

$$P_L = \int_{S_1} I_1(\epsilon, \eta) ds \quad (3)$$

其中 \$S_1\$ 为接收望远镜的接收区域, \$P_0\$ 中继镜系统为光源功率,则中继镜系统上行链路能量耦合效率 \$\eta\$ 可表示为

$$\eta = P_L / P_0 \quad (4)$$

2) 光束质量

二次光源是上行光束远距离传输后进行相位校正得到的,在光束净化过程中,光束的强度分布不发生变化。因此,二次光源光束质量评价需要同时考虑光源的相位影响和强度分布不均匀影响。参考斯特列尔比的定义,分别定义相位引入的斯特列尔比 \$S_{R1}\$ 和强度分布不均匀引入的斯特列尔比 \$S_{R2}\$ 如下:

$$S_{R1} = \frac{\text{实际光源焦斑处峰值强度}}{\text{理想相位光源焦斑处峰值强度}} \quad (5)$$

$$S_{R2} = \frac{\text{实际光源焦斑处峰值强度}}{\text{理想强度均匀光源焦斑处峰值强度}} \quad (6)$$

二次光源的光束质量 \$T_{sys}\$ 为

$$T_{sys} = S_{R1} \times S_{R2} \quad (7)$$

设定中继镜系统上行发射望远镜口径为 \$D_0\$, 上行接收望远镜口径为 \$D_1\$, 光源具有圆对称性,则中继镜系统上行接收光场分布可表示为

$$U_1(r) = \frac{2\pi e^{jks_1}}{j\lambda s_1} e^{i\frac{k}{2s_1}r^2} \int_0^{D_0/2} U_p(R) e^{i\frac{k}{2s_1}R^2} J_0\left(\frac{kRr}{2s_1}\right) R dR \quad (8)$$

其中 \$r = \sqrt{\epsilon^2 + \eta^2}\$, \$R = \sqrt{x^2 + y^2}\$, \$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{[-jx\cos(\theta-\varphi)]} d\theta\$ 为 0 阶贝塞尔函数。中继镜系统经望远镜接收的光束功率(二次光源功率)可表示为

$$P_L = 2\pi \int_0^{D_1/2} U_1(r) U_1(r)^* r dr \quad (9)$$

上行接收光束在相位净化过程中光束强度分布不变,因此中继镜系统二次光源振幅可表示为

$$U_d(r) = \begin{cases} |U_1(r)|, & r \leq D_1/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

二次光源聚焦传输 L 距离时,由于对称性焦斑中心强度位于焦斑中心,可表示为

$$I_{\max} = U_2(0)U_2(0)^* \quad (11)$$

$$U_2(\gamma) = \frac{2\pi e^{jkL} e^{\frac{jk}{2L}\gamma^2}}{j\lambda L} \int_0^{D_1/2} U_d(r) J_0\left(\frac{k\gamma r}{2L}\right) r dr \quad (12)$$

与中继镜系统二次光源对应的相同功率强度均匀分布的光源振幅可表示为

$$U'_d(r) = \begin{cases} \sqrt{4P_L/\pi D_1^2}, & r \leq D_1/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

该光源聚焦传输 L 时,焦斑中心强度位可表示为

$$I'_{\max} = U'_2(0)U'_2(0)^* \quad (14)$$

$$U'_2(\gamma) = \frac{2\pi e^{jkL} e^{\frac{jk}{2L}\gamma^2}}{j\lambda L} \int_0^{D_1/2} U'_d(r) J_0\left(\frac{k\gamma r}{2L}\right) r dr \quad (15)$$

将式(11)、式(12)、式(14)和式(15)代入式(6)可得

$$S_{R2} = \left\{ \frac{\int_0^{D_1/2} U_d(r) r dr}{\int_0^{D_1/2} U'_d(r) r dr} \right\}^2 \quad (16)$$

进一步将式(8)~(10)、式(13)代入式(16)得出

$$S_{R2} = \frac{8 \left\{ \int_0^{D_1/2} \left| \int_0^{D_0/2} U_p(R) e^{j\frac{k}{2s_1}R^2} J_0\left(\frac{kRr}{2s_1}\right) R dR \right| r dr \right\}^2}{D_1^2 \int_0^{D_1/2} \left| \int_0^{D_0/2} U_p(R) e^{j\frac{k}{2s_1}R^2} J_0\left(\frac{kRr}{2s_1}\right) R dR \right|^2 r dr} \quad (17)$$

1.2.2 系统作用效果

中继镜系统对目标作用时,目标处光场的峰值功率密度可表示为

$$I_p = \frac{\pi D_2^2 P_L T_a T_\lambda T_{\text{sys}}}{4\lambda^2 s_2^2} \quad (18)$$

式中, D_2 为下行聚焦望远镜口径, λ 为激光波长, s_2 为下行传输的距离, T_a 为下行传输过程中大气扰动引入的斯特尔比, T_λ 为下行传输过程大气能量透过率, T_{sys} 为二次光源的光束质量。将式(8)和式(9)代入式(18)可得

$$I_p = \frac{2\pi^4 D_2^2 T_a T_\lambda T_{\text{sys}}}{\lambda^4 s_1^2 s_2^2} \int_0^{D_1/2} \left| \int_0^{D_0/2} U_p(R) e^{j\frac{k}{2s_1}R^2} J_0\left(\frac{kRr}{2s_1}\right) R dR \right|^2 r dr \quad (19)$$

定义上行链路性能参数 T_s 为

$$T_s = \eta \times T_{\text{sys}} \quad (20)$$

则式(18)可表示为

$$I_p = \frac{\pi D_2^2 P_0}{4\lambda^2 s_2^2} T_a T_\lambda T_s \quad (21)$$

可得系统作用效果与上行链路性能参数具有线性正比关系。

2 模型计算

2.1 参数设置与模型近似

设定光源为单位功率的理想平台光束且初始相位为零,波长 $\lambda = 3.8\mu\text{m}$,光源复振幅分布可表示为

$$U_p(R) = \begin{cases} \sqrt{4/\pi D_0^2}, & R \leq D_0/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

中继平台位于光源垂直上方 30km,目标高度 20km,光束准直上传,发射望远镜与接收望远镜口径相同($D_0 = D_1$)。同时假定上行接收光束净化过程中相位校正完全, $S_{R1} = 1$,二次光源光束质量为 $T_{\text{sys}} = S_{R2}$ 。

2.2 计算结果及分析

2.2.1 计算结果

根据式(8)~(10)、式(19)和式(22)计算得到:采用不同口径下行望远镜时,目标处峰值功率密度与上行链路望远镜口径关系曲线如图 3 所示。

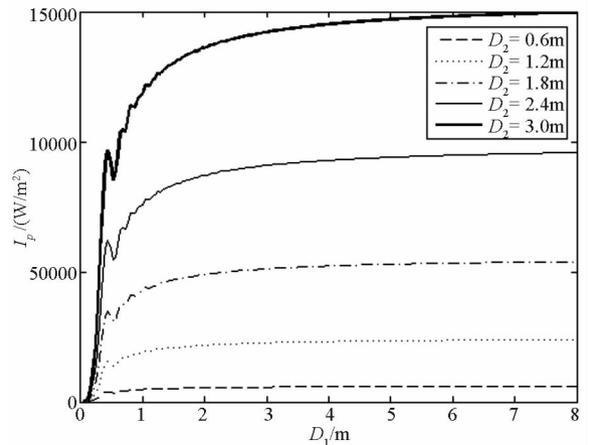


图 3 目标处峰值功率密度与上行链路望远镜口径关系曲线

Fig. 3 Curve of the peak power density at the target and the uplink telescope aperture

由结果可得: $D_1 \leq 0.42\text{m}$ 时,系统作用效果随着上行链路望远镜口径的增加而显著增加; $0.42\text{m} \leq D_1 \leq 0.54\text{m}$ 时曲线出现突降,系统作用效果随着上行链路望远镜口径的增加而急剧下降; $D_1 \geq 0.54\text{m}$ 时,系统作用效果随着上行链路望远镜口径的增加而增加,但当望远镜口径增加到一定大小后,系统作用效果趋向于稳定值,望远镜口径的增加对系统作用效果的提升不具有明显作用。

2.2.2 突降现象原因分析

在 0.42 ~ 0.54m 口径范围内,中继镜系统对目标的作用效果随着上行链路望远镜口径增大出现突降,本节我们计算分析突降现象的原因。根据式(20)和式(21),得出中继镜系统对目标的作用效果由上行链路性能参数(上行链路能量耦合效率 η 和二次光源的光束质量 $T_{sys} = S_{R2}$ 乘积)决定。根据式(4)、式(8)、式(9)和式(22)计算得出中继镜系统上行链路能量耦合效率与系统上行链路望远镜口径关系曲线如图 4 所示。

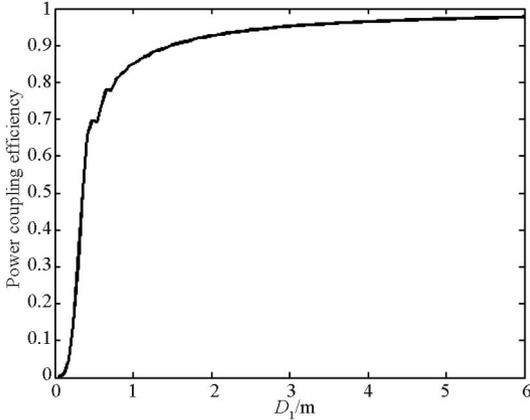


图 4 上行链路能量耦合效率与上行链路望远镜口径关系曲线

Fig. 4 Curves of uplink power coupling efficiency and the uplink telescope aperture

由图 4 得出:中继镜系统上行链路能量耦合效率随着上行链路望远镜口径的增加而不断提高,随着上行链路望远镜口径的增加,光束上行传输过程的费涅尔数不断增加,衍射发散导致的能量损耗不断降低。

根据式(8)~(10)、式(13)、式(17)和式(22)计算得出中继镜系统二次光源光束质量(强度分布不均匀引入的斯特列尔比)与系统上行链路望远镜口径关系曲线如图 5 所示。

由图 5 得出: $D_1 \leq 0.54m$ 时,中继镜系统二次光源光束质量(强度分布不均匀引入的斯特列尔比)随着上行链路望远镜口径的增加而不断降低,当 $D_1 = 0.54m$ 时达到最低值 $S_{R2} = 0.7886$; $D_1 \geq 0.54m$ 时,中继镜系统二次光源光束质量(强度分布不均匀引入的斯特列尔比)随着上行链路望远镜口径的增加而不断提高。我们计算了上行链路望远镜分别取 0.3m、0.42m、0.50m、0.54m 和 0.70m 时,中继镜系统上行链路接收光束的强度分布如图 6 所示。

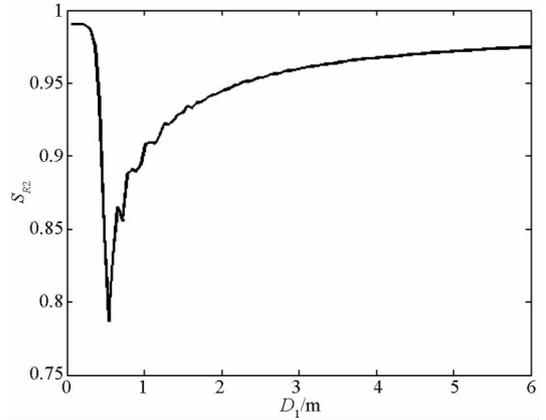


图 5 二次光源光束质量与上行链路望远镜口径关系曲线

Fig. 5 Curves of the secondary source beam quality and the uplink telescope aperture

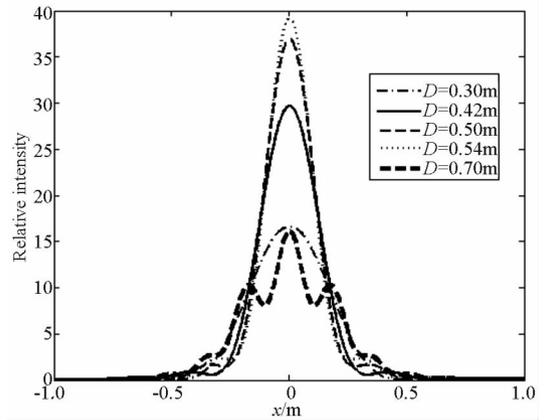


图 6 上行光束的强度分布图

Fig. 6 Intensity distribution of the uplink beam

由图 6 得出:上行链路望远镜分别取 0.3m、0.42m、0.50m 和 0.54m 时,上行接收光束的不均匀性随着上行链路望远镜口径增加而增加,上行链路望远镜取 0.70m 时,上行接收光束的不均匀性较 0.54m 时有所下降。

综合考虑上行链路能量耦合效率和二次光源光束质量对系统打击效果的影响,根据式(8)~(10)、式(13)、式(17)、式(20)和式(22)计算得出系统上行链路性能参数与望远镜口径关系曲线如图 7 所示。

由图 7 得出:中继镜系统上行链路性能参数 T_s 随着上行链路望远镜口径的增加而显著增加;在 0.42 ~ 0.54m 范围内,上行链路性能参数 T_s 随着上行链路望远镜口径的增加而急剧下降; $D_1 \geq 0.54m$ 时,上行链路性能参数 T_s 随着上行链路望远镜口径的增加而逐步增加。因此,中继镜系统打击效果在上行链路望远镜 0.42 ~ 0.54m 口径范围出现突降的根本原因是该范围内上行接收光束强度的不均匀性严重降低了系统二次光源的

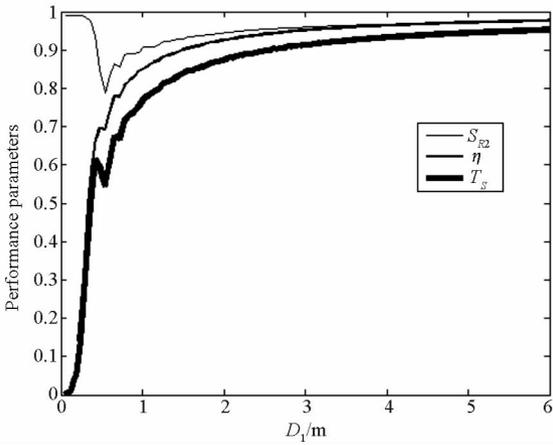


图 7 上行链路各参数与上行链路望远镜口径关系曲线
Fig. 7 Curves of uplink performance parameters and the uplink telescope aperture

光束质量,从而急剧降低了系统打击效果。

3 结 论

本文详细计算分析了 30km 中继镜系统作用效果与上行链路望远镜口径关系,得出系统作用效果与望远镜口径具有如下关系:口径低于 0.42m 时,作用效果随着望远镜口径增大而显著提升;在 0.42 ~ 0.54m 范围内,接收光束强度不均匀性导致了二次光源光束质量急剧下降,作用效果随着上行链路望远镜口径增大而显著降低;大于 0.54m 时,作用效果随着上行链路望远镜口径的增加而增加,当望远镜口径增加到一定大小后,系统作用效果趋向于稳定值,望远镜口径的增大无益于提升系统性能。因此,需要根据系统平台高度、载荷能力等因素综合设置系统望远镜参数,文章的计算结果对中继镜系统的设计具有一定参考意义。

参考文献 (References)

[1] Hartman M, Restaino S, Baker J, et al. EAGLE/relay mirror technology development [J]. Proc. SPIE, 2002(4724): 110 - 117.
[2] Steven G L. Laser options for national missile defense[R]. Air Command and Staff College Air University, Alabama, April 1998:75 - 84.

[3] Dierks J S, Ross S E, Brodsky A, et al. Relay mirror experiment overview: a GBL pointing and tracking demonstration [J]. Proc. SPIE, 1991, 1482:146 - 158.
[4] Glen P, Michael A, Matthew G. High energy laser weapons: technology overview [J]. Proc. SPIE, 2004, 5414:1 - 3.
[5] Scott L J. Beam control of extremely agile relaying laser source for bifocal relay mirror spacecraft [D]. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2006:1 - 2.
[6] David M. A three degree of freedom test bed for nanosatellite and cubest attitudedynamics, determination and control [D]. Naval Postgraduate School, 2009: 1 - 76.
[7] Gregory E G. Broad departmental application of directed energy systems [C]//Proceedings of Directed Energy Weapon SMI Conference, The Hatton, London, 2004:7 - 28.
[8] 任国光,黄吉金. 美国高能激光技术 2005 年主要进展[J]. 激光与光电子学进展,2006,43(6): 5 - 6.
REN Guoguang, HUANG Jijin. Major progress of U. S. 2005' High-energy laser technology [J]. Laser& Optoelectronics Progress, 2006,43(6):5 - 6. (in Chinese)
[9] Edwards A D, Donald C W. The magic of relay mirrors [J]. Proc. SPIE 2004(5413): 139 - 143.
[10] 吴慧云,吴武明,陈金宝,等. 100kW 固体中继镜系统对 1km 高度目标作用效果模拟[J]. 光学学报, 2008,28: 1967 - 1970.
WU Huiyun, WU Wuming, CHEN Jinbao, et al. Simulation of effect of 100 kW solid-state laser relay mirror system on 1km altitude target [J]. Acta Optica Sinica, 2008,28:1967 - 1970. (in Chinese)
[11] Louis M O. Boeing demonstrates aerospace relay mirror system [N/OL]. [2006 - 08 - 18]. <http://www.spacewar.com/reports/>.
[12] Simpson J. Tactical laser relay mirror demonstration anticipated before 2011[R]. Inside The Air Force, 2007,18 (41):3.
[13] 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008,45:67 - 69.
REN Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2008, 45:67 - 69. (in Chinese)
[14] Defense Science Board, Department of Defense. Report of the defense board task force on high energy laser weapon system applications [R]. June 2001:56.
[15] 季家谔. 高等光学教程[M]. 北京,科学出版社,2007:203 - 207.
JI Jiarong. Higher optics course [M]. Beijing: Science Press,2007 :203 - 207. (in Chinese)