

导航卫星激光后向反射器研究

钟声远,李长桢,陈念江,徐广平,吕华昌,吴健
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要: 鉴于设计 Galileo 导航卫星上激光后向反射器的需要,采用理论计算和实验验证的方法对角反射器的光行差补偿设计和远场衍射光强分布进行了研究。对不同直角偏差、是否镀膜反射膜的角反射器远场衍射光强分布给出了计算和试验结果。研究表明:理论计算与实验结果是完全一致的;对类似 Galileo 卫星的角反射器设计采用光行差角补偿是必要的,以及采用反射面不镀膜是合适的。

关键词: 角反射器;光行差;补偿角;远场衍射

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.003

Study of the laser retro-reflector on navigation satellites

ZHONG Sheng-yuan, LI Chang-zhen, CHEN Nian-jiang, XU Guang-ping, LÜ Hua-chang, WU Jian
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: This paper mainly discusses the design theory and various experiments of retro-reflector on Galileo navigation satellite. It is given out the calculated and experimental results of far field diffracting distribution of the laser retro-reflector. The work has been done on different corner angle aberrance and on retro-reflectors with and without film. Our researches indicate that: it is necessary to take aberration compensation into account in the corner-cube reflector design of navigation satellites as Galileo, and it is appropriate to design the reflecting surfaces without coating.

Key words: cube corner reflector; velocity aberration; compensatory corner; far field diffracting

1 引言

在 20 世纪 60 年代末, R. F. Chang 和 C. O. Alley 等人对阿波罗激光角反射器(简称 CCR)的物理光学特性进行了系统的理论研究^[1], 自此以来, 不断地报道有关卫星后向反射器(LRR)的设计和应用性能研究^[2-8]。对于低轨道的卫星角反射器(CCR)来说, 均采用光行差角补偿设计, 而且反射面镀金属膜层。但对于高轨道(20000 km 左右)的导航卫星来说, 由于速差角小, 且在卫星激光测距(SLR)范围内, CCR 的激光入射角小于全反射临界角, 因此, 目前国际上对此类角反射器的设计是否采用光行差角补偿和镀反射膜是不相同的。近年来, 我们结合 Galileo 导航卫星的激光后向反射器设计, 对高轨卫星角反射器进行了较深入的研究和一系列实验, 实

验结果表明采用包括光行差角补偿在内和非镀膜设计的 Galileo 后向反射器是合理的。

2 角反射器的反射光特性及光行差补偿设计

2.1 反射光特性

依据激光角反射器原理, 出射光束由图 1 表示的六个相互平行的子光束合成。采用极坐标系统, 坐标原点位于光孔中心, z 轴与光孔垂直, 根据夫琅和费远场衍射理论, 对出射光孔面积分, 得出在远场衍射花样(FFDP)中 P 点的归一化光振幅表示为^[1,5]:

作者简介: 钟声远(1937-), 男, 研究员, 长期从事激光应用技术研究。曾获多项国家级、部级科学进步奖。E-mail: zhong1937@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-03-07; **修订日期:** 2011-04-01

$$A(p) = \frac{1}{\pi a^2} \sum_{n=1}^6 \gamma^n \int_0^a \int_{(n-1)\pi/3 - \pi/6}^{(n-1)\pi/3 + \pi/6} e^{ik[\rho\theta_0 \cos(\phi - \phi_n) + \rho\theta \cos(\phi - \psi)] + ik\delta} \rho d\rho d\phi \quad (1)$$

$$\phi_n = n\pi/3 - \pi/3$$

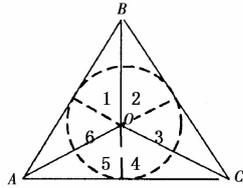


图1 六子光束
Fig.1 six sub-beam of light

衍射强度:

$$U(p) = A(p) \cdot A^*(p) \quad (2)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$; λ 为光波长; θ_0 为入射光经三直角面连续三次反射后的出射角(出射光相对入射光的夹角); ψ 为 P 点方位角; θ 为衍射角(\overline{OP} 与 Z 轴夹角); δ 为 CCR 的表面不平度产生的光程差; a 为光孔半径; γ^n 为第 n 部分的归一化偏振复振幅,

对于反射面镀金属膜的 CCR 来说下,所有的 $\gamma^n = 1$ 。

对于非镀膜(全内反射)角反射器来说,CCR 的 FFDP 归一化偏振分量振幅为:

$$A_p = \frac{1}{\pi a^2} \sum_{n=1}^6 \gamma_p^n \int_0^a \int_{(n-1)\pi/3 - \pi/6}^{(n-1)\pi/3 + \pi/6} e^{ik[\rho\theta_0 \cos(\phi - \phi_n) + \rho\theta \cos(\phi - \psi)] + ik\delta(\varepsilon)} \rho d\rho d\phi \quad (3)$$

$$A_s = \frac{1}{\pi a^2} \sum_{n=1}^6 \gamma_s^n \int_0^a \int_{(n-1)\pi/3 - \pi/6}^{(n-1)\pi/3 + \pi/6} e^{ik[\rho\theta_0 \cos(\phi - \phi_n) + \rho\theta \cos(\phi - \psi)] + ik\delta(\varepsilon)} \rho d\rho d\phi \quad (4)$$

FFDP 光强为:

$$U(\theta, \psi) = A_p \cdot A_p^* + A_s \cdot A_s^* \quad (5)$$

用 γ_p^n, γ_s^n 分别表示第 n ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 部分出射光 P_3 和 S_3 偏振分量复振幅:

$$\gamma_p^n = R_p^n + iI_p^n \quad (6)$$

$$\gamma_s^n = R_s^n + iI_s^n$$

由参考文献[10]得出各子光束的偏振分量的实部 R_p^n, R_s^n 和虚部 I_p^n, I_s^n 函数, 分别列在表1和表2中, 表中 γ 为入射光偏振光振动方向。

表1 子光束的 γ_p^n 分量

n	R_p^n	I_p^n
1	$-0.2325 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) - 0.2598 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.5411 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) - 0.7492 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$
2	$-0.2325 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.2598 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.5411 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.7492 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$
3	$-0.341 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.043 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.9193 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.1203 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$
4	$0.341 \cos\gamma - 0.043 \sin\gamma$	$0.9193 \cos\gamma + 0.1203 \sin\gamma$
5	$0.1088 \cos\gamma + 0.2555 \sin\gamma$	$-0.3783 \cos\gamma + 0.8695 \sin\gamma$
6	$-0.1088 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) - 0.2555 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.3783 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) - 0.8695 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$

表2 子光束的 γ_s^n 分量

n	R_s^n	I_s^n
1	$-0.145 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) + 0.2598 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.5715 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) + 0.773 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$
2	$-0.145 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.2598 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.5715 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) - 0.773 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$
3	$0.2975 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) + 0.0715 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$	$0.9552 \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right) + 0.082 \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \gamma\right)$
4	$0.2975 \sin\gamma - 0.0715 \cos\gamma$	$0.9552 \sin\gamma - 0.082 \cos\gamma$
5	$-0.1525 \sin\gamma - 0.3313 \cos\gamma$	$-0.3836 \sin\gamma - 0.855 \cos\gamma$
6	$-0.1525 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) + 0.3313 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$	$-0.3836 \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right) + 0.855 \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \gamma\right)$

根据衍射光强和能量的关系,可求得衍射角半径 θ 在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 环内间的归一化能量为:

$$E(\theta_1, \theta_2) = \frac{\pi a^2}{\lambda^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} U(\theta, \psi) \cdot \theta d\theta d\psi \quad (7)$$

设在角半径 θ 圆环上的平均归一化强度:

$$\bar{U}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta, \psi) d\psi \quad (8)$$

代入式(7)得:

$$E(\theta_1, \theta_2) = \frac{2\pi^2 a_0^2}{\lambda^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \bar{U}(\theta) \theta d\theta \quad (9)$$

在角半径 θ 圆环上的归一化能量为:

$$e(\theta) = \frac{dE(\theta)}{d\theta} = \frac{2\pi^2 a_0^2}{\lambda^2} \theta \cdot \bar{U}(\theta) \quad (10)$$

根据以上理论,对不同直角偏差和反射表面是否镀金属膜的 CCR 进行 FFDP 比较计算,设 CCR 的入射面为正六边形,内切圆直径为 33 mm,表面不平整度为 $\lambda/10$,测量波长 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$,材料为石英玻璃,入射光偏振角 $\gamma = 0^\circ$,计算结果:图 2 所示为对反射表面镀金属膜、不镀膜和直角偏差 β 为 $0''$, $0.8''$ 的光强分布比较;图 3 所示为反射面不镀膜情况下的不同直角偏差的光强分布比较。

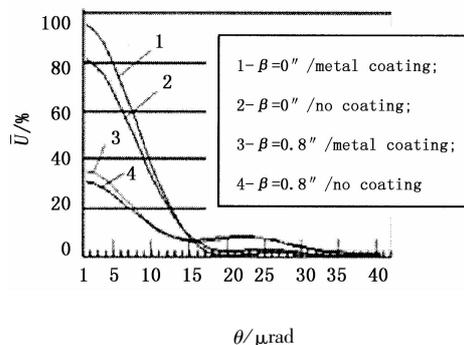


图 2 反射面性质的光强分布

Fig. 2 light intensity for reflecting surface kinds

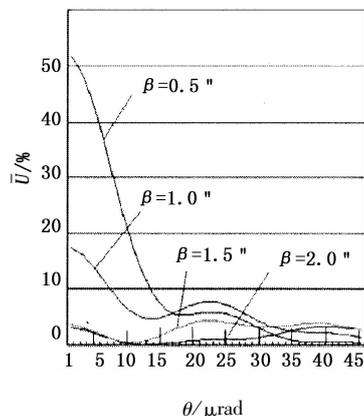


图 3 不同直角偏差的光强分布

Fig. 3 light intensity for right angle windages

2.2 后向反射器设计

2.2.1 光行差角补偿设计

当卫星绕地球运动时,由于速差 (velocity aberration) 效应,从地面发射的激光经卫星后向反射器反射后,出射光相对入射光方向偏离速差角 a_v ,反射到地面的激光光斑中心偏离激光测距 (SLR) 位置。例如:轨道高度为 23222 km 的 Galileo 卫星,地面激光测量站 (SLR) 对卫星的仰角 $15^\circ \sim 90^\circ$ 内的速差角为 $23.90 \sim 24.44 \mu\text{rad}$,转换到地面激光光斑几何中心将偏离激光发射位置距离不小于 567 m。

由图 2 和图 3 可以看出,不同 CCR 直角偏差所得到的光强和能量分布完全不一样,因此通常采用适当的直角偏差加强在 SLR 的光强分布影响,所谓光行差角补偿设计。根据 CCR 的几何光学原理,当垂直表面入射时,出射角 (出射角) θ_0 为^[9]:

$$\theta_0 = 2n_0 \left[\frac{2}{3} (\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 + \beta_1\beta_2 + \beta_1\beta_3 - \beta_2\beta_3) \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别表示 CCR 的三个直角偏差; n_0 为 CCR 折射率。当三个直角偏差相等, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$, 由式(13)得:

$$\theta_0 = 3.26n_0\beta \quad (12)$$

2.2.2 综合设计

根据雷达截面积的通用公式,并考虑到 FFDP 在等于速差角的衍射角位置 ($\theta = a_v$) 的归一化光强 $\bar{U}(a_v)$,对于在同一平面内的 CCR 阵列的 LRR 光学雷达截面积可以表示为^[10]:

$$\sigma_{LS} = \frac{4\pi a_2}{\lambda^2} \rho A_s \bar{U}(a_v) \quad (13)$$

式中, ρ 为 CCR 有效反射率; λ 为激光波长; a 为 CCR 入射表面内切圆半径; A_s 为 LRR 有效反射面积。由式(1)、式(2)可知光强分布不仅是直角偏差的函数,也是 CCR 尺寸和表面加工精度的函数,在 LRR 总有效反射面积 A_s 确定的条件下,对 CCR 尺寸 a 、直角偏差 β 和表面不平整度误差 δ 进行优化设计,使在衍射角半径等于光行差角半径的圆周上的光强达到最佳值。以 Galileo 卫星 (轨道高度为 23222 km) LRR 的设计结果为例: CCR 底面内切圆直径为 33 mm; 直角偏差为 $0.8''$ (加工误差 $\pm 0.5''$): 表面不平整度为 $\lambda/10$ 。按此计算的不同偏振方向入射光的 CCR 归一化强度分布及 3D FFDP 分别如图 4 和图 5 所示,可以看出不同偏振角的光强峰值处

在衍射 24 μrad 处。

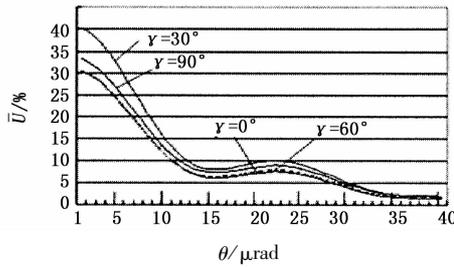


图4 衍射归一化光强分布
Fig.4 FFDP normalized intensity

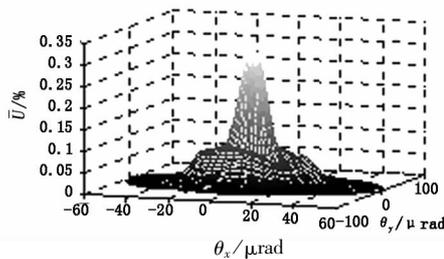


图5 γ=0°三维衍射光强分布
Fig.5 γ=0°3D FFDP intensity

对于多块 CCR 组成的阵列后向反射器 (LRR) 来说,归一化衍射光强分布为^[10]:

$$U_{LRR}(\theta, \psi) = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L A_m e^{-i\alpha_m} \sum_{n=1}^L A_n^* e^{i\alpha_n} \quad (14)$$

式中, A 和 α 分别为每块 CCR 的归一化衍射振幅和相位角; L 是 LRR 组件的 CCR 数量。对于 CCR 平面阵列 LRR 组件来说,可以采用统计平均计算:

$$\overline{U_{LRR}}(\theta) = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L A_m \cdot A_m^* \quad (15)$$

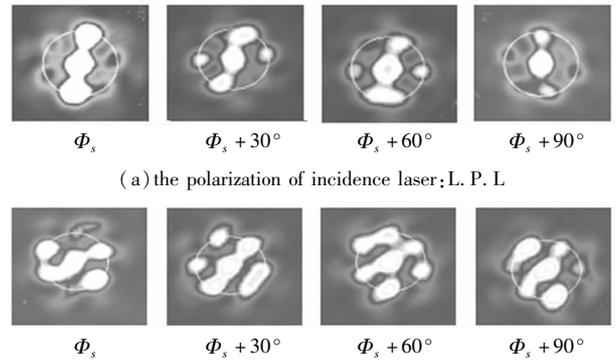
以 Galileo-LRR 为例:它是由 84 块 CCR 组成的平面阵列,垂直表面入射的 LRR 有效反射面积为 790 cm²,由式 (13) 计算的光雷达截面积为 60 × 10⁶ m²。

3 实验结果及分析

采用的实验设备是专门用于来测量 CCR/LRR,系统主要参数:激光波长 532 nm;准直光束输出直径 180 mm/590 mm;成像系统焦距 51 m;像分辨力 0.5 μrad。采用 LBA-PC 型光束分析仪录取 FFDP 图像和测量其能量分布。试验说明如下:非镀膜后向反射器实验样品取自 Galileo-LRR 产品;样品标志括号($\beta_1, \beta_2, \beta_3$)内表示三个直角偏差;所有 FFDP 图像中的参考圆角半径为 24 μrad。

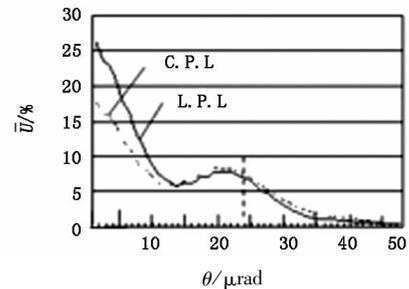
(1)对 Galileo-CCR 样品的 FFDP 实验结果:图 6 给出圆偏振光 (C. P. L) 和线偏振光 (L. P. L) 的 FFDP 对比实验图像, ($\phi_s + \phi$) 是表示 CCR 入射光方位参考角,其中 ϕ_s 是起始角参考位置, ϕ 是相对

初始方位的角度。光强分布 $\overline{U}(\theta)$ 和能量分布 e 如图 7 所示,它是 $\phi_s \sim \phi_s + 90^\circ$ 四幅图像的平均值,而每幅图像的光强分布与平均值非常接近,也就是说,光强分布与入射光偏振角的关系小,尤其是 C. P. L 情况下。由图 7 可以看出光强分布峰值 (除中心光斑) 和能量分布最高峰值均处于 24 μrad (Galileo 卫星速差角半径) 左右。

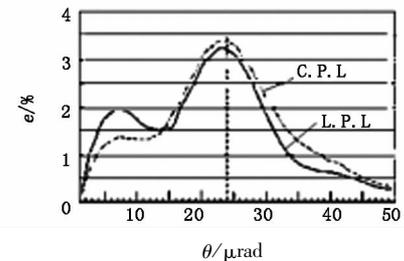


(a) the polarization of incidence laser: L. P. L
图6 CCR 259#(0.7", 1.0", 1.1") 的 FFDP 实验图像

Fig.6 the FFDP photographs for CCR 259#(0.7", 1.0", 1.1") to test



(a) light intensity distributing



(b) energy distributing

图7 CCR 259#(0.7", 1.0", 1.1") 的 FFDP 试验曲线

Fig.7 the FFDP test curves for CCR 259#(0.7", 1.0", 1.1")

图 8 和表 3 分别给出几种不同直角偏差 (Galileo-CCR 直角偏差设计值为 0.8" ± 0.5") 的 FFDP 实验对比图像和和光强值,可以看出在角偏差设计范围内的六个子光斑中心均处在 24 μrad 为半径的圆周附近。由表 3 得在角半径 24 μrad 处的平均光强值为 7.33。由此可见试验结果与理论设计值是一致的。

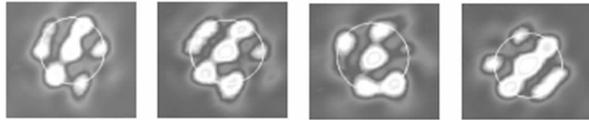


图8 不同角偏差 CCR 的 FFDP 图像(C. P. L 光源)

Fig.8 the FFDP photographs for CCRs with the angle warps to use C. P. L

表3 FFDP 光强测量值

CCR NO.	直角偏差 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$)/ (")	$\bar{U}/\%$			
		$\theta = 10 \mu\text{rad}$	$20 \mu\text{rad}$	$24 \mu\text{rad}$	$30 \mu\text{rad}$
386#	(0.5, 1.2, 0.8)	6.75	7.42	7.13	3.96
268#	(1.3, 0.7, 0.8)	6.10	7.65	7.18	3.92
225#	(0.5, 0.6, 0.9)	6.76	7.78	7.41	3.27
321#	(0.5, 0.7, 0.4)	8.37	7.97	7.52	3.77

(2)对不同直角偏差、反射面镀银膜的 CCR 样品(入射表面内切圆直径为 30 mm)的 FFDP 实验图像如图 9 所示,图 10 表示测量的能量分布曲线。可以得出反射面镀银膜的 2#(0.8",0.9",1.2")归一化能量分布规律与图 7 表示的类似角偏差的非镀膜情况相同,反射面是否镀膜无关,但在 24 μrad 角半径处的归一化能量密度,前者是 2.7%,而低于后者非

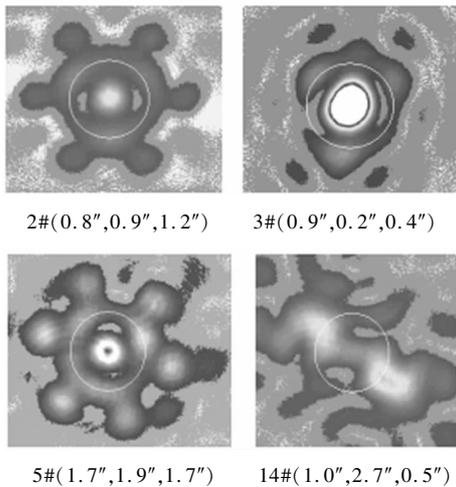


图9 镀银膜角反射器的 FFDP 图像

Fig.9 the FFDP photographs for CCRs with the silverskin

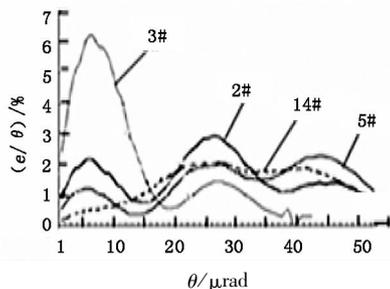


图10 FFDP 能量分布

Fig.10 FFDP energy distributing for

镀膜的 3.4%。从不同角偏差的实验情况来看,3#(0.9",0.2",0.4")在衍射角半径 24 μrad 的归一化能量是 1.3%,远小于 2#(0.8",0.9",1.2")的 2.8%,可见角偏差对光能分布的影响是相当严重的。

(3) LRR 组件(CCR 阵列)远场衍射实验结果

Galileo 卫星 LRR 是由 84 块 CCR、按 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 四种不同安装相位 Φ (如图 11 所示)组合的平面阵列。图 12 是 Galileo 卫星 LRR 组件的 FFDP 实验图像,图中参考圆环半径为 24 μrad 。测量得出的能量分布和光强分布曲线如图 13 所示,在衍射角半径 24 μrad 环上的平均光强为 6.5%,Galileo 卫星 LRR 在垂直入射时的有效反射面积为 792 cm^2 ,由式(13)可得雷达截面积为 $6.2 \times 10^8 \text{m}^2$ 。

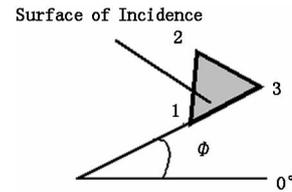


图11 CCR 位置相位

Fig.11 CCR location on phase

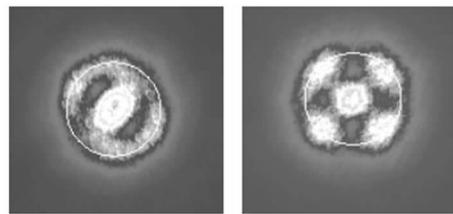
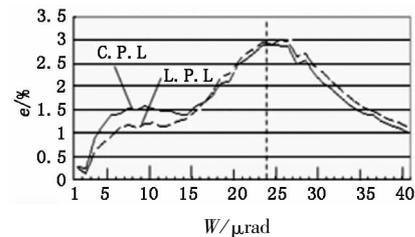
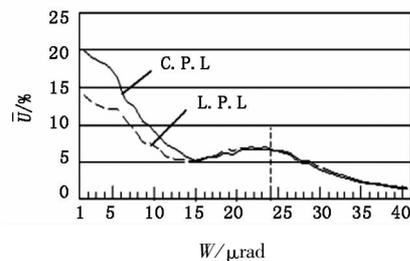


图12 Galileo-LRR 组件 FFDP 实验图像

Fig.12 the FFDP photographs for Galileo-LRR to test



(a) the normalized energy distributing



(b) the normalized intensity distributing

图13 组件 FFDP 分布曲线

Fig.13 the FFDP curves for Galileo-LRR

4 结束语

综合以上对导航卫星激光后向反射器的研究结果表明了:CCR 的设计采用光行差角补偿对增大处在卫星速差角位置的 SLR 处的激光能量密度是非常有利的;采用激光雷达截面积优化设计的 Galileo-CCR 的尺寸和直角偏差达到了满意效果,设计和实验结果非常符合;反射面镀膜和非镀膜 CCR 的远场衍射光在角半径环上的平均归一化能量密度分布规律是一致的,但在速差角半径处的能量密度,后者要高于前者,还不包括前者的反射光能损失。需要说明的是上述研究结果未考虑大气的影响,实际上大气湍流将不同程度地影响由卫星 CCR 反射到地面的光能分布。

参考文献:

- [1] R F Chang, D G Currie, C O Ally. Apollo laser ranging retro-reflector experiment[J]. NASA, 1971, N71 - 21466.
- [2] Peter O Minott. Design of retro director arrays for laser ranging of satellites[J]. NASA, 1974, N74 - 26306.
- [3] P O Minott. Measurement of the radar cross section of cube corner arrays for laser ranging of satellites[J]. GS-FC, NASA TMX-70863 (N75-20707), 1974.
- [4] David A Arnold. Technical report RTOP161-05-02, Grant NGR 09-015-002 Supplement NO. 57, February, 1975.
- [5] Zhong Shengyuan. Theoretical analysis of far field distribution of diffraction of corner-cube reflector[J]. Laser & Infrared, 1975, 10:645 - 656. (in Chinese)
- 钟声远. 角反射器合作目标的远场衍射能量分布理论分析[J]. 激光与红外, 1975, 10:645 - 656.
- [6] Wan Qiang, Guo Yanneng, Wang Xiaobing, et al. Present status and progress of laser cooperative targets for SLR [J]. Development of Laser & Photoelectron, 2005, 42 (5):20 - 23. (in Chinese)
- 万强, 郭延能, 王小兵, 等. 卫星激光测距合作目标技术现状和进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42 (5):20 - 23.
- [7] Zhong Shengyuan, Xu Guangping, Wu Jian. Study of the diffraction light Intensity in the far-field on the satellite laser cube corner reflector[J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (2):128 - 132. (in Chinese)
- 钟声远, 徐广平, 吴键. 卫星激光角反射器的远场衍射光强研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(2):128 - 132.
- [8] Peter O Minott, Design of retrodirector arrays for laser ranging of satellites[J]. 1974, N74 - 26306.
- [9] Zhong Shengyuan. Theoretical caculation of corner-cube reflector[J]. Laser & Infrared, 1973, 3(12):1 - 15. (in Chinese)
- 钟声远. 关于角体合作目标性质的理论计算[J]. 激光与红外, 1973, 3(12):1 - 15.
- [10] G Charmaine Gilbreath, Peter B Rolsma, Robert Kessel, et al. Robert B Patterson, and James A. Georges III. Performance characteristics of a retro-reflector array optimized for a LEO spacecraft [R]. NRL Report, 8120 - 97 - 9875, December, 1997.