

激光跟踪中目标卫星表面BRDF 对回波信号的影响

张雷洪¹, 孙刘杰¹, 马秀华²

- (1. 上海理工大学 出版印刷与艺术设计学院, 上海 200093;
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 通过双向反射分布函数(BRDF)公式, 模拟了空间激光主动照明跟踪中, 相同材料、不同粗糙度下卫星表面的 BRDF, 得出了随着卫星表面材料粗糙度的增加, 镜面反射分量越小, 漫反射分量越大, 双向反射分布散射角越宽, 接收到的回波信号对方向的敏感性减小。同时模拟了入射角度对卫星表面 BRDF 的影响, 得出了照明光束小角度入射、接收信号方向与照明光束方向一致时, 镜面反射分量的增加增强了反馈信号, 当大角度入射时, 反馈信号急剧减小。当入射角大于 34° 时, 通过卫星表面 BRDF 计算得到的最小接收功率, 比之前把卫星目标看成朗伯体, 通过激光雷达公式计算得到的最小接收功率小。得出了增加照明光束的发射功率为原来的 5 倍, 或者增大接收口径为原来的 2.5 倍, 可以消除大入射角度带来的接收功率的减小, 使得系统有 4 倍的功率余量。

关键词: 双向反射分布函数; 空间激光跟踪; 漫反射; 回波信号

中图分类号: TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)08-2048-05

Influence of bidirectional reflection distribution function of target satellite surface on echo in laser tracking

Zhang Leihong¹, Sun Liujie¹, Ma Xiuhua²

- (1. College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The bidirectional reflection distribution of target satellite surface with different roughness was simulated by the formula of the bidirectional reflection distribution function (BRDF) in laser tracking in the space. The component of diffuse reflection became larger and the component of specular reflection became smaller with the increase of the target surface roughness. Meanwhile, the scattering angle became larger. These benefited the random receiving direction and decreased the sensitivity of receiving direction. The varieties of BRDF of target satellite surface affected by the change of the incident angle were also simulated. The change of bidirectional reflection distribution was obtained. The receiving echo increased with the increase of the component of specular reflection, when the incident angle was small and the illumination beam axis and receiving telescope axis were coaxial. The receiving echo power decreased quickly with the increase of the incident angle. When the incident angle was larger than 34° , the minimum receiving echo power computed by BRDF was lower than the one computed by the formula of lidar supposing that the

收稿日期: 2011-12-10; 修订日期: 2012-01-23

作者简介: 张雷洪(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光跟踪系统方面的研究。Email: Zlh12345_2004@sina.com.cn

target satellite surface was Lambertian reflection plate. The illuminating laser power should become 5 times the former one or the receiving aperture became 2.5 times the former one. These methods could remove the effect of the decrease of the receiving echo power.

Key words: bidirectional reflection distribution function; laser tracking in the space; diffuse reflection; echo

0 引言

空间激光主动照明跟踪系统中,目标卫星表面的反射分布不均,对接收装置接收到的目标卫星表面反射回来的光信号有很大影响。参考文献[1-3]对激光主动照明跟踪导弹进行了深入研究,通过非相干光束的叠加,均匀照明导弹“鼻尖”处,减小了导弹表面镜面反射的影响,使导弹漫反射回来的光信号能够被接收装置探测到。参考文献[4-13]通过激光雷达公式,对星载激光高度计和星载激光雷达主动照明跟踪中照明光束的最小激光发射功率进行了估算。参考文献[1-13]都是把跟踪目标作为一个均匀的朗伯体,通过激光雷达公式计算反馈信号的大小。空间目标卫星为了保持一定的内部工作温度,一般在表面涂有一定的绝热涂层,涂层材料以及涂层粗糙度对于目标表面的反射分布有很大的影响,进而影响回波信号。卫星在空间有一定的姿态,照明光束与目标卫星表面有一定的入射角,会极大地影响目标表面的反射分布。对目标卫星表面的 BRDF 的研究,随着激光制导、跟踪、引信、电磁波(光波)遥感等军用与民用技术的发展,越来越受到重视。文中通过目标表面 BRDF 公式,模拟了目标卫星表面的 BRDF,分析了涂层粗糙度以及主动照明入射角对目标卫星表面 BRDF 的影响,进而分析了收发同轴时,卫星表面反射状况对接收回波信号的影响,同时计算了主动照明激光器发射的最小功率和接收装置的最小口径。

1 空间激光跟踪中目标卫星表面 BRDF

空间激光主动照明跟踪系统如图 1 所示。激光跟踪发生在空间两颗同轨道运行的卫星之间,主卫星对围绕其做旋转运动的伴飞目标卫星进行扫描、捕获、跟踪,实现光通信。安装在主卫星上的跟踪系统的信标光通过两轴联动经纬仪上的反射镜主动照明目标卫星,引导激光束自动扫描、捕获和跟踪同轨道运行的目标卫星,接收望远镜接收目标卫星表面

漫反射回来的信号光,测量目标卫星的方位和距离。两轴联动经纬仪可以实现水平和俯仰角度的转动,带动扫描反射镜实现对目标卫星的高速扫描跟踪。

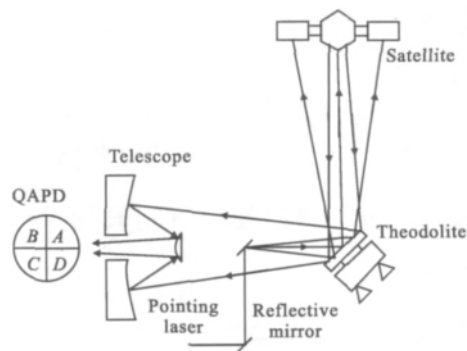


图 1 空间激光跟踪装置

Fig.1 Device of laser tracking in the space

主动照明光束入射到目标卫星表面后发生漫反射,如图 2 所示。卫星表面的涂层或者包层材料有一

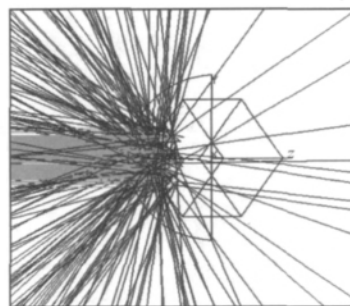


图 2 卫星表面的漫反射

Fig.2 Diffuse reflection of the target satellite surface

定的粗糙度,与通常的标准漫反射板的反射分布不同,这里采用目标表面 BRDF 来表征目标表面的反射状况。根据参考文献[7]可得卫星表面 BRDF 公式:

$$BRDF = BRDF_{\text{spec}} + BRDF_{\text{diff}} = \frac{A}{\cos^{\theta_i}(\theta_i)} \exp\left[\frac{-\tan^2(\theta_i + \theta_r)}{s^2}\right] + B \cos^{0.5}(\theta_r) \quad (1)$$

式中: A, B 为与粗糙度和材料有关的反射系数, A 为镜面反射系数, B 为漫反射系数; θ_i 为入射光束俯仰角; θ_r 为出射光束俯仰角; s 为反映表面粗糙度的斜

度; ϕ_i 为入射光束的方位角; ϕ_r 为出射光束的方位角。入射光束与出射光束的俯仰与方位角如图 3 所示。文中只考虑二维分布, $\phi_i=0, \phi_r=\pi$ 。

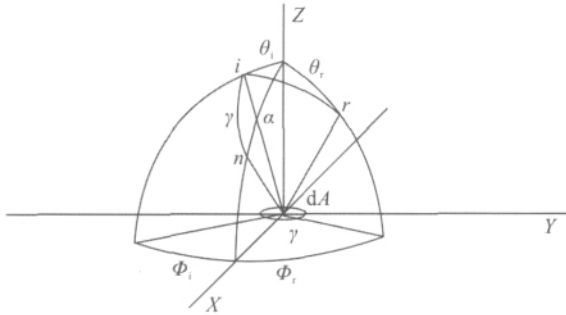


图 3 入射光束与出射光束的俯仰与方位角
Fig.3 Angle of incidence and reflection beam

2 目标卫星表面材料粗糙度对表面 BRDF 的影响

目标卫星表面一般采用特殊的材料为包层和涂层。这 2 种材料特别是涂层材料的粗糙度有一定的差别, 进而影响表面 BRDF。可以通过计算同一种材料、不同粗糙度时, BRDF 公式中 A, B 的数值, 绘出目标卫星表面的双向反射分布图。公式(1)BRDF 对半球积分, 可以求得目标表面总体反射率为:

$$\rho = \int_0^{2\pi} f(\phi_r) \left[\frac{A}{\cos^6(\theta_r)} \exp\left[\frac{-\tan^2(\theta_r + \theta_i)}{s^2}\right] + B \cos^{0.5}(\theta_r) \right] d\Omega \quad (2)$$

式中: $f(\phi_r)$ 是反射光线方位角的函数。

$$TIS = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\phi_r) d\phi_r \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [B \cos^{0.5}(\theta_r)] d\theta_r}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\phi_r) d\phi_r \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{A}{\cos^6(\theta_r)} \exp\left[\frac{-\tan^2(\theta_r + \theta_i)}{s^2}\right] d\theta_r + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\phi_r) d\phi_r \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [B \cos^{0.5}(\theta_r)] d\theta_r} \quad (4)$$

粗糙度时的 A, B 值, 进而绘出表面 BRDF, 如图 5 所示。

由图 4, 5 可见: (1) 卫星表面材料的粗糙度越小, 卫星表面越接近于一个镜面, 越容易发生镜面反射, 因此, 随着卫星表面材料粗糙度的增加, 镜面反射分量越来越小, 而漫反射分量越来越大。粗糙度增加一倍, 镜面反射降为原来的 1/8, 而漫反射分量变为原来的 8 倍; (2) 表面越粗糙, 卫星表面越接近于一个漫反射体, 越容易发射朗伯散射, 因此, 双向反

总体积分散射 TIS 与表面粗糙度的关系为基尔霍夫公式^[14]:

$$TIS = \frac{R_d}{\rho} = \left(\frac{4\pi\delta\cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

式中: R_d 为漫反射率; ρ 为总体反射率; δ 为卫星表面粗糙度的微观几何形状误差。当入射角度一定时, 根据公式(3)可以绘制 TIS 随卫星表面粗糙度的变化曲线, 如图 4 所示。由图可见, 随着表面粗糙度的增加, 漫反射分量越来越大。

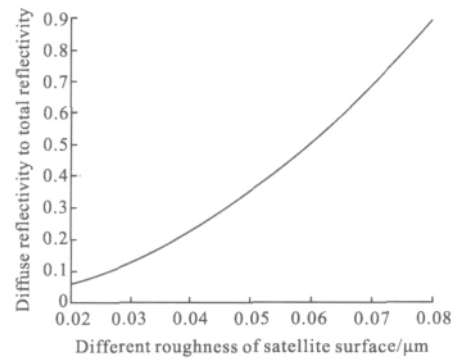


图 4 总体积分散射 TIS 随卫星表面粗糙度大小的变化
Fig.4 Changes of TIS vs different roughness of satellite surface

TIS 可以表示为漫反射分量与总体反射的比值为:

$$\text{文中只考虑二维表面 BRDF, } \phi_r=0, \pi, \text{ 则 } \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\phi_r) d\phi_r = 1, \rho=0.1.$$

联立公式(2)~(4)可以求出同一种材料不同粗

射分布散射角越宽, 粗糙度增为原来的两倍时, 散射角变为原来的两倍; (3) 表面粗糙度不影响总体反射率, 因此, 图 5 中, 双向反射分布曲线对半球立体角积分后的总体反射率不变; (4) 表面粗糙度的增加, 增加了漫反射分量, 使得在垂直于卫星表面方向的接收功率减小, 而其他接收方向上的接收功率增加, 消除了由于镜面反射时只有在垂直于卫星表面方向才能接收到足够功率的方向敏感性。

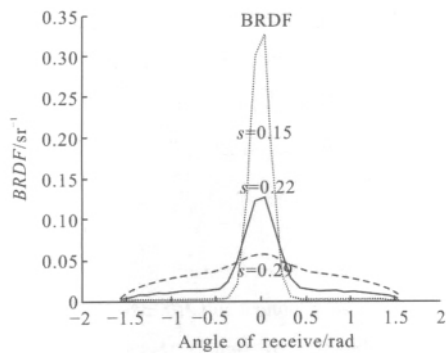


图 5 卫星表面 BRDF 随卫星表面粗糙度大小的变化

Fig.5 Changes of BRDF vs different roughness of satellite surface

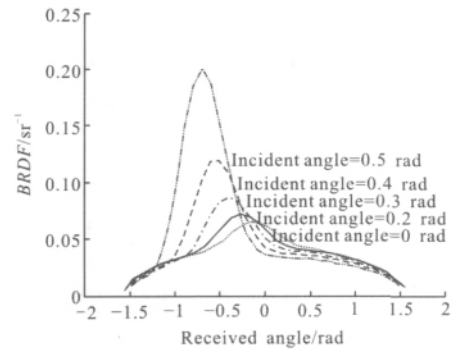


图 7 卫星表面 BRDF 与入射角的关系

Fig.7 Changes of BRDF vs different incident angle of satellite surface

3 照明光束入射角度对目标卫星表面BRDF的影响

由工程光学中的菲涅耳公式可知,入射角越大,表面总体反射率越大。卫星表面材料吸收率较小,计算时可以忽略入射角对总体反射率的影响。通过公式(2)~(4),采用相同的办法,计算出不同入射角情况下的 A, B 值,如图 6、7 所示。

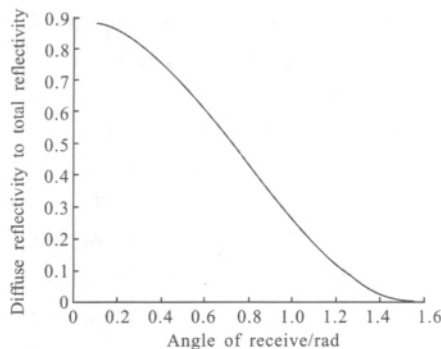


图 6 TIS 随照明光束对卫星表面入射角的变化

Fig.6 Changes of TIS vs different incident angle of satellite surface

由图 6、7 可见:(1) 当大入射角照明卫星表面时,由粗糙度决定的表面遮蔽因子变大,漫反射分量被遮挡住因而变小,因此,入射角越大,镜面反射分量越大,而漫反射分量越小;(2) 入射角越大,能够照明的范围越大,镜面反射分量的散射角越大;(3) 镜面反射符合光学上的平面反射原理,当入射角大于零时,卫星表面 BRDF 在与入射方向相对应的镜面反射方向上的反射量最大。镜面反射之外的部分由于漫反射分量总体减小,呈现一个山形;(4) 当照明光束小角度入射,并且接收信号方向与照明光束方向一致时,镜面反射分量的增加增强了反馈信号,当大角度入射时,反馈信号急剧减小。

4 卫星表面 BRDF 对最小接收功率的影响

激光主动照明跟踪中,接收光轴和发射光轴是同轴的,即 $\theta_r = \theta_t$,因此,接收的反馈信号可以通过 BRDF 求出。在 $\theta_r = \theta_t$ 接收方向上, Ω 立体角内接收的光功率为:

$$p_r(\theta_i) = f_r I_i \cos \theta_i \Omega \tag{5}$$

式中: f_r 为表面 BRDF; I_i 为单位面积上入射到卫星表面的光通量; $p_r(\theta_i)$ 为 $\theta_r = \theta_t$ 出射方向上的辐射功率; θ_i 为入射角; S 为照明光束内的卫星表面面积; Ω 为 $\theta_r = \theta_t$ 出射方向上接收装置接收口径的立体角。

参考文献[4]中把卫星表面看成一个标准漫反射的朗伯体,它在各个方向的辐射亮度是相同的,计算 $\theta_r = \theta_t$ 接收装置接收到的光功率为:

$$p_r'(\theta_i) = \frac{I_i S \cos \theta_i \rho}{2\pi} \Omega \tag{6}$$

把卫星表面看成一个具有 BRDF 反射特性的一般散射体得到的最小接收功率 $p_r(\theta_i)$,以及把卫星表面看成一个朗伯体得到的最小接收功率 $p_r'(\theta_i)$,两种计算方法得到的最小接收功率的比值为:

$$a = \frac{p_r(\theta_i)}{p_r'(\theta_i)} = \frac{f_r(\theta_i)}{\frac{\rho}{2\pi}} = \frac{\left(\frac{A}{\cos^6(\theta_r)} \exp \left[\frac{-\tan^2(\theta_r + \theta_t)}{s^2} \right] + B \cos^{0.5}(\theta_r) \right)}{\frac{\rho}{2\pi}} \tag{7}$$

根据图 7 计算出的入射角 θ_i 和接收角 θ_r 方向的 f_r 的值,计算 a 的值,得出采用 BRDF 和激光雷达公式两种计算最小接收功率方法的比值随入射角变化的曲线,如图 8 所示。可以看出,(1) 当照明光束小角度入射时,由于卫星表面不是绝对的朗伯体,有一定的镜面反射,导致接收到的反馈信号增强,比之前通过激光雷达公式计算的最小接收功率大 2~3 倍;

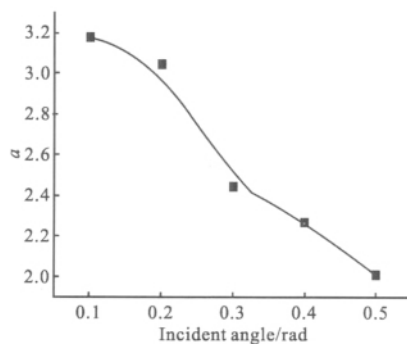


图 8 两种计算最小接收功率方法的比值与入射角的关系
Fig.8 Relationship of the rate of two kinds of calculating the smallest receiving power and incident angle

(2) 照明光束入射角度越大,漫反射分量越小,镜面反射分量越大,而镜面反射分量有一定的方向性,造成收发同轴时,主动照明跟踪装置接收到的反馈信号减小;(3) 当入射角大于 34° 时,通过 BRDF 得到的最小接收功率比通过激光雷达公式计算的最小接收功率小,必须通过增加发射功率和增大接收口径来增强接收功率。(4) 卫星表面的镜面反射在小角度入射时,能够增强反馈信号,当大角度入射时,反馈信号急剧减小,激光跟踪时,必须很好地控制卫星姿势。

卫星表面的镜面反射分量在小角度入射时,能够起到增强回波信号的作用,当入射角小于 34° 时,通过卫星表面的 BRDF 计算得到的回波信号,是通过把卫星表面看成朗伯体时,采用激光雷达公式计算得到的回波信号的 2~3 倍,利于跟踪卫星。当大角度入射时,反馈信号急剧减小,镜面反射对于跟踪极为不利。此时,主动照明光束的发射能量需要增加到以朗伯体计算得到的最小照明发射功率的 5 倍,或者把接收口径变为原来的 2.5 倍,使得当入射角度小于 34° 时,最小接收功率有 4 倍的余量。

5 总结

文中通过 BRDF 公式,模拟了同一种卫星表面材料不同粗糙度下卫星表面的 BRDF。得出随着卫星表面材料粗糙度的增加,镜面反射分量越小,而漫反射分量越大。表面越粗糙,卫星表面越接近于一个漫反射体,越容易发生朗伯散射,同时,双向反射分布散射角越宽。模拟了主动照明光束入射角度对目标卫星表面 BRDF 的影响。得出照明光束小角度入射时,镜面反射分量导致接收到的反馈信号增强,当入射角大于 34° 时,通过 BRDF 得到的最小反馈信号比通过激光

雷达公式计算的最小接收功率小,反馈信号急剧减小。以研究卫星表面材料粗糙度和照明光束入射角度对 BRDF 的影响为基础,提出了增加照明光束的发射功率和增大接收口径来增强接收功率的解决方案。

参考文献:

- [1] Higgs C, Barclay H, Cusumano S, et al. Active tracking using multi beam illumination[C]//SPIE, 1998, 3381: 160-167.
- [2] Higgs C, Barclay H, Kansky J, et al. Adaptive-optics compensation using active illumination[C]//SPIE, 1998, 3381: 47-56.
- [3] Merritt P H, Kramer M A. Field test of active tracking of a ballistic missile in the boost phase[C]//SPIE, 1997, 3086: 2-9
- [4] Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong, et al. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(3): 262. (in Chinese)
- [5] Zhang Leihong, Ma Xiuhua, Chen Weibiao, et al. Factors affecting laser power received in system of tracking, acquisition and pointing in space[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(S): 264-267.
- [6] Wang Fei, Lei Humin. Optimum fusion algorithms for tracking based on IR/MMW dual-sensor guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 250-254. (in Chinese)
- [7] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [8] Liu Fanglin, Liu Erqi, Liu Zhi, et al. Tracking framework for found infrared object in clutter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 139-142. (in Chinese)
- [9] Cui Wujun, Zhang Guilin. Tracking moving objects in video from an airborne observer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 111-116. (in Chinese)
- [10] Ouyang Jianfei, Xia Fei, Liu Wanli, et al. Kinematics analysis of laser guidance measuring robot system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 79-81. (in Chinese)
- [11] Stavridi M, Ginneken B, Koenderink J J. Surface bidirectional reflection distribution function and the texture of bricks and tiles[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(16): 3717-3725.
- [12] Wolff L B. Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 2956-2968.
- [13] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897-901. (in Chinese)
- [14] Elson J M, Rahn J P, Bennt J M. Relationship of the total integrated scattering from multi-layer-coaredoptics to angle of incidence, polarization, correlation length, and roughness cross-correlation[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(20): 3270-3219.