

基于 MB 模型的简化偏振 BRDF 模型建立与仿真

颀孙晓博^{1,2}, 武文远^{1,2}, 黄雁华^{1,2}, 龚艳春^{1,2}, 吴成国¹, 李兆兆¹

(1. 解放军理工大学 理学院, 江苏 南京 211100;

2. 解放军理工大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 偏振 BRDF 模型的计算往往非常复杂, 为了简便准确地获取伪装目标和背景的反射光偏振度差值, 采用特殊值法和理想化方法对 Maxwell-Beard BRDF 模型中的微面元分布函数和遮蔽函数进行简化, 使微面元分布函数较 Torrance-Sparrow 模型更准确, 较 Maxwell-Beard 模型更简单。然后利用 Fresnel 反射中物体对光线平行分量和垂直分量反射率不同的性质, 采用物理理论分析的方法计算得到表示反射过程的 Muller 矩阵, 并建立了其矢量 BRDF 模型。针对面内反射, 利用 Matlab 对模型进行模拟, 仿真结果证明: 模型可以描述粗糙表面反射偏振特性。研究结果对研究粗糙表面反射偏振特性的影响因素及伪装目标偏振探测有一定的理论和实践意义。

关键词: 偏振 BRDF 模型建立; 偏振度; Stokes 矢量; 粗糙度

中图分类号: O436.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)03-1098-05

Establishment and simulation of simplified polarimetric BRDF model based on MB model

Zhuansun Xiaobo^{1,2}, Wu Wenyuan^{1,2}, Huang Yanhua^{1,2}, Gong Yanchun^{1,2}, Wu Chengguo¹, Li Zhaozhao¹

(1. College of Science, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211100, China;

2. National Key Laboratory on Environmental Electromagnetic Effects and Electro-Optic Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The compute of pBRDF model is very complex in most cases. In order to get the contrast of degree of linear polarization (DOLP) between camouflaged target and background accurately and conveniently, the distribution function of microfacet and shadowing function in the Maxwell-Beard BRDF model was simplified with the method of idealization and specific values. The distribution function of microfacet become more accurate than Torrance-Sparrow model and easier than Maxwell-Beard model. According to the property that there are differences between the rate of s component and the p component in Fresnel reflection, the Muller matrix which record the process of reflection was got. Then a polarimetric BRDF model was established by physical theoretical analysis. To cope with in-plane reflection, the pBRDF model was simulated by MATLAB and the results show it can describe the reflecting properties of rough surfaces. The model has theoretical and practical significance for the study of the influencing factors of the reflection by rough surface and polarimetric camouflaged target detecting.

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-08-15

作者简介: 颀孙晓博(1990-), 男, 硕士生, 主要从事伪装目标偏振成像探测方面的研究工作。Email: 391549654@qq.com

导师简介: 武文远(1963-), 男, 教授, 硕士生导师, 硕士, 主要从事激光物理与技术、光电探测理论与技术等方面的研究工作。

Email: wuwenyuan12@163.com

Key words: establishment of pBRDF model; degree of polarization; Stokes vectors; roughness

0 引言

光通过粗糙度不同的物体会产生不同的偏振态,利用偏振图像对目标探测已经成为新的热点。多数偏振探测是通过仪器测量经过目标表面反射光光强,然后通过计算得出所需偏振度信息。因此,反射光的光强和偏振度在空间上的分布情况是光电探测中重要的信息,这些信息可由二向反射分布函数(BRDF)反映出来。它表现出物体的基本光学特征,描述物体反射光谱在上半球空间(以所研究物体表面上一点为原点,方位角为 0°到 360°,天顶角为 0°到 180°的空间区域)的强度分布情况,目前对于标量 BRDF 建模已经取得了一定的成果^[1]。1973 年,Maxwell 首先提出一种可以模拟涂层表面 BRDF 的模型,即 Maxwell-Beard BRDF 模型。MB 模型比计算机图形化的提出模型早很多,随后又被改进成一种使用公认反射经验参数(NEFDS)的模型,进而被广泛使用。它囊括了很多当时已有的其他理论模型所具有的一些性质,是一种很重要的模型^[2]。偏振二向反射分布函数是 BRDF 更一般的表达式,不但描述了方向散射的大小,而且描述了散射的偏振特征。Priest 和 Germer、Priest 和 Meier 分别在 2000 年和 2002 年对微面元提出了一种普遍适用的 pBRDF 模型,这种模型认为微面元表现出二维高斯分布,从而可以计算出反射辐射的偏振态;Fetrow 提出基于 Torrance-Sparrow BRDF 模型^[3]的改进 pBRDF 模型;Meyers 综合 Priest 的微镜面反射理论和 Torrance-Sparrow 的体散射成分理论提出了一种混合模型^[4]。

pBRDF 模型相对于 BRDF 模型来说更加复杂,参数反演和数据测量也更加困难和麻烦,特别是微面元分布函数的确定,一直没有既准确又便于计算的模型,所以大多数工作还停留在理论阶段。针对以上困难,文中利用特殊值法和理想化法对 Maxwell-Beard BRDF 模型进行简化,并基于这个简化模型提出一种便于计算的 pBRDF 模型。该模型参数反演相对简单,适用于实际计算。

1 Maxwell-Beard BRDF 模型的简化

Maxwell-Beard BRDF 模型 (MB 模型) 最早由 Maxwell 和 Beard 提出,其表达式为^[2]:

$$f_r(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) = f_{r_{surf}}(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) + f_{r_{vol}}(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) = \frac{R_F(\beta)}{R_F(0)} \frac{f_{ZBS}(\theta_N) \cos^2 \theta_N}{\cos \theta_i \cos \theta_r} SO(\tau, \Omega) + \rho_D + \frac{2\rho_V}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \quad (1)$$

$$f_{ZBS}(\theta_N) = \frac{R_F(0)D(\theta_N, \Phi_N)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (2)$$

$$SO(\tau, \Omega) = \frac{1 + \frac{\theta_N}{\Omega} e^{-\frac{2\beta}{\tau}}}{1 + \frac{\theta_N}{\Omega}} \frac{1}{1 + \frac{\Phi_N \theta_i}{\Omega}} \quad (3)$$

式中: θ_i 、 Φ_i 、 θ_r 、 Φ_r 分别表示入射光和反射光的天顶角和方位角; $f_{r_{surf}}$ 和 $f_{r_{vol}}$ 分别表示表面反射分量 and 体散射分量。微面元经验密度函数记为 $D(\theta_N, \Phi_N)$, 单位为 sr^{-1} , 其中 θ_N 为面元法向量的天顶角, Φ_N 为面元法向量的方位角; R_F 为非涅尔耳射系数; SO 表示遮蔽和掩盖函数; ρ_D 和 ρ_V 分别是与体反射中的朗伯反射成分和非朗伯反射成分有关的经验常数。角度关系如图 1 所示。

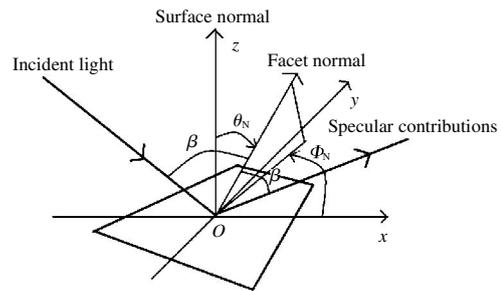


图 1 角度关系

Fig.1 Relationship between angles

$D(\theta_N, \Phi_N)$ 是 θ_N 的函数,故需要先求得 θ_N 的分布函数,才能确定 $D(\theta_N, \Phi_N)$ 的值。Torrance 对于微面元的处理方法是通过对观察和实验分析出材料的微面元分布函数具体表达式,这种方法只能用于某种特定材料,没有普遍适用性。而 Maxwell 对微面元的处理方法是测量多组不同角度下的实验数据,通过计算机对数据拟合,反演出微面元分布函数表

达式,这种方法所需实验数据量大,计算复杂。文中采用理论与实验相结合的方法处理微面元问题,根据 Torrance 的研究,在法平面方向上的平面内,可以认为 θ_N 大致服从高斯分布。对于不同的表面,可以用两个经验参数 a 、 b 对分布函数进行修正。所以把 $D(\theta_N, \Phi_N)$ 函数表达式表示如下:

$$D(\theta_N) = ae^{-b\theta_N^2} \quad (4)$$

直接通过理论分析涂层表面微面元来确定 $D(\theta_N, \Phi_N)$ 函数是很复杂的,在对实验结果精度要求不高的情况下,可以用 0° 双基地角的方法确定微面元的函数分布。当探测器和光源都位于目标正上方时,可以认为 $\theta_i = \theta_r = 0$, 此时探测器上得到的光强就是上文提到的 $f_{ZBS}(\theta_N)$, 且没有反射过程,不受遮蔽函数干扰 ($SO=1$), 满足简化后的 MB 模型,通过变形可以得到:

$$D(\theta_N) = \frac{4(f_{ZBS}(\theta_N) - \rho_D - \rho_V)}{R_F(0) \cos^2 \theta_N} \quad (5)$$

通过测量不同入射角和反射角下的反射分量值可分别反演出 ρ_D 和 ρ_V 同 θ_N 之间的关系, 带入公式 (5) 后, 联立公式 (4)、(5) 可算出 θ_N 的值。

由于 MB 模型主要用于涂料表面, 且涂料大多采用喷涂技术, 所以微面元分布在与目标表面平行的方向内呈现出很强的对称性, 所以只考虑在目标表面法向方向平面内不同角度的反射特性, 也即 $\Phi_N = 0$ 。此时, 模型中的表面反射分量和遮蔽函数都得到了简化, 只需考虑微面元的 θ_N 角度分布对反射光的影响。简化后的形式如下:

$$f_r = \frac{ae^{-b\theta_N^2} R_F(\beta) \cos^2 \theta_N}{4 \cos^2 \theta_i \cos^2 \theta_r} \frac{1 + \frac{\theta_N}{\Omega} e^{-\frac{2\beta}{\tau}}}{1 + \frac{\theta_N}{\Omega}} + \rho_D + \frac{2\rho_V}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \quad (6)$$

2 基于 MB 简化模型的矢量 pBRDF 模型的建立

pBRDF 模型是在标量 BRDF 模型的基础上进一步得来的, 表征了物体在上半球空间内反射辐射的偏振特性, 可以认为是矢量形式的 BRDF。体散射分量是光线照射到目标表面后被吸收, 并在目标内部经过多次反射后出射的辐射。每次反射后, 光的偏振态都会发生变化, 经过多次随机反射, 可认为光线已经没有明显的偏振特性。故文中认为体反射分量为

非偏振光, 目标散射偏振特性完全由表面反射分量体现出来。所以, 首先要对表面反射分量的 pBRDF 建模。因 Stokes 参数可以表示任意偏振态, 所以可以用相应的 Stokes 矢量代替标量值以得到 $f_{r,surf}$ 的矢量形式^[5], 于是有:

$$L = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_0 & f_{01} & f_{03} & f_{03} \\ f_{03} & f_{03} & f_{03} & f_{03} \\ f_{30} & f_{03} & f_{03} & f_{03} \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_0 \\ f_{03} \\ f_{30} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_{r,surf} = \frac{L(\theta_r, \Phi_r)}{E(\theta_r, \Phi_r)} \quad (8)$$

由上式可知, $F_{r,surf}$ 是一个 4×4 的矩阵, 用 $F_{ij,r,surf}$ 表示 $F_{r,surf}$ 中第 i 行 j 列的元素值。根据简化 MB 模型的标量形式容易得出其矢量形式的 pBRDF 模型, 表示如下:

$$F_{ij,r,surf} = \frac{R_F(\beta)}{R_F(0)} \frac{f_{ZBS}(\theta_N) \cos^2 \theta_N}{\cos \theta_i \cos \theta_r} SO(\tau, \Omega) \times M_{ij} \quad (9)$$

M_{ij} 是目标 Muller 矩阵 M 中第 i 行 j 列元素的元素值, 矩阵 M 反映出光线经过目标反射后偏振态改变情况。为求出矩阵 M 的值, 先只考虑面内反射, 则有 $\Phi_r - \Phi_i = 0$ 。

定义 S 和 P 分别为光线的垂直振动分量和平行振动分量, S 和 P 都垂直于传播方向。把入(反)射辐射相对于微元面和目标表面两个入(反)射面之间的夹角记为 $\eta_i(\eta_r)$ 。由 Fresnel 反射定律, 假设反射过程可以用以下方程式表示:

$$E_r = aE_i \quad (10)$$

式中: E_i 、 E_r 分别是包含入射、反射光中 s 分量和 p 分量的二维列向量。 a 是 Fresnel 反射系数矩阵, 它是一个 2×2 的复对角矩阵。由几何关系可以得出以下方程:

$$\begin{pmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{ss} & T_{ps} \\ T_{sp} & T_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\eta_r) & \sin(\eta_r) \\ -\sin(\eta_r) & \cos(\eta_r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{ss} & 0 \\ 0 & a_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\eta_i) & -\sin(\eta_i) \\ \sin(\eta_i) & \cos(\eta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{pmatrix} \quad (11)$$

需要注意的是, a_{ss} 和 a_{pp} 是 Fresnel 反射振幅反射比, 并非强度反射比, 它们是 β 的函数, 同时 β 又是 θ_i 、 θ_r 、 $\Phi_r - \Phi_i$ 的函数。根据光传播、反射的电磁理论可求出金属表面的菲涅耳反射系数 a_{ss} 和 a_{pp} ^[6]。 Bohren 和 Huffman 给出了 Jones 矩阵和 Mueller 矩阵

之间的关系,所以 M_{ij} 的具体值理论上都可以求出。根据 Priest 和 Meier 的理论,可以得到 η_i, η_r 与 $\theta_i, \theta_r, \Phi_r - \Phi_i$ 之间的角度关系,故 $F_{r,surf}$ 中每个元素都可以求出^[7]。

3 矢量 pBRDF 模型的仿真及讨论

文中通过 Matlab 对以上模型进行了仿真模拟。如上文所述,反射光偏振态主要是由表面反射分量决定,所以文中只针对粗糙目标的表面反射分量进行仿真。仿真的对象有:(1)标量的 BRDF 与表面粗糙程度、入(反)射角之间的关系;(2)自然光照射时,出射光的偏振度同表面粗糙程度、入(反)射角之间的关系。文中的经验参数值是直接引用 Maxwell 和 Beard 实验所得的数值: $\Omega=40, \tau=15, n=1.65$ 。

在面内反射的情况下,假设 $\theta_i = \theta_r \in [(0^\circ, 90^\circ], \theta_N \in [(0^\circ, 60^\circ]$ 。用 θ_N 的值表示表面的粗糙程度, θ_N 值越小,表面越光滑;反之, θ_N 值越大,表面越粗糙。仿真结果如图 2 所示。

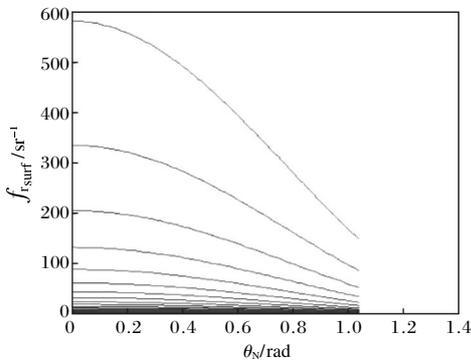


图 2 不同粗糙程度表面 BRDF 值
Fig.2 Value of BRDF in different roughness

从上到下的曲线分别对应的是入射角从 $90^\circ \sim 0^\circ$ 的反射光强度同粗糙程度 θ_N 之间的关系。

通过模型计算获得的矩阵 $F_{r,surf}$ 可理解为光线在粗糙表面发生反射过程的传递矩阵。入射光的矢量形式为 $S_{in}=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, 经反射后的光线矢量为 $S_{out}=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, 则反射过程可用表示为^[8]:

$$S_{out} = F_{r,surf} \times S_{in} \quad (12)$$

进而可以得到不同粗糙程度和不同入(反)射角下的线偏振度(图 3、4):

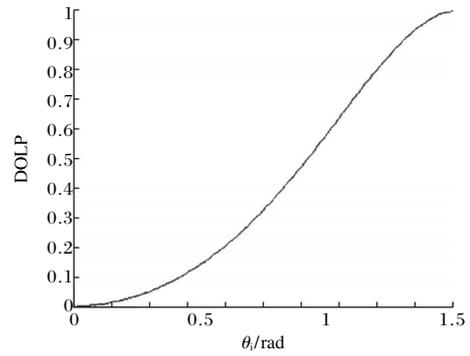


图 3 线偏振度和入射角之间关系(光滑表面)

Fig.3 Relationship between Dolp and incident angles(smooth surface)

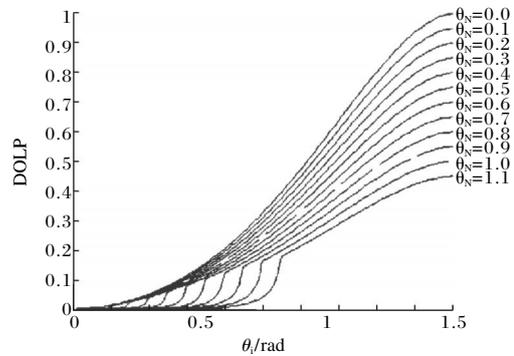


图 4 线偏振度和入射角之间关系(粗糙表面)

Fig.4 Relationship between Dolp and incident angles(rough surface)

$$Pold = \frac{\sqrt{S_{1out}^2 + S_{2out}^2}}{S_{0out}} \quad (13)$$

针对以上实验结果做如下讨论。

(1)图 2 中多条曲线关系表明:①在所有的粗糙程度下,反射光强都随着入射角和反射角之间的夹角增大而增大,即反射光强随着入射角的增大而增大。②随着角度的增大,入射角大的曲线的最大值和最小值之差比入射角小的曲线最大值和最小值之差大。曲线的最大值和最小值之差反应的是遮蔽函数对反射过程的影响。这是因为入射角大,光线与平面成的角度小,微面元受到其他微面元遮蔽的概率大,因此遮蔽函数影响较大;反之,入射角小,反射过程受到遮蔽函数的影响也小。

(2)图 3 的结果是用文中提出的简化的 MB pBRDF 模型在表面光滑情况下得到的线偏振度与入射角之间的关系。图 4 表明了不同粗糙程度下的线偏振度与入射角之间的关系。这是因为在 Fresnel 反射中, s 分量的反射系数随入射角增大而减小, p

分量的反射系数随入射角先减小后增大，且增速大于 s 分量的增速，故理想情况下偏振度与入射角的关系应如图 3 所示，符合已有理论对此关系的描述。随着反射表面粗糙度的增加，入射光发生多次反射的概率增加。多次反射使反射方向和偏振方向宏观上不满足 Fresnel 反射定律，因此具有消偏作用，且表面越粗糙，消偏作用越明显，偏振度越低。

4 结论

利用已有且公认准确度很高的 Lawrence 模型对该模型进行验证。由于二者都是仿真实验，且都是模拟实验室环境下的实验，所以实验环境和实验器材所带来的影响因素可以忽略不计。对比图如图 5 所示，图中的实线表示 Lawrence B. Wolff 用精确模型进行仿真的结果^[9]，虚线表示文中所提模型在相应粗糙度下的仿真结果。数据对比如表 1 所示。

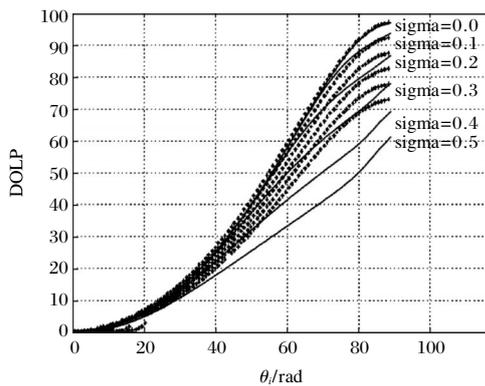


图 5 与 Lawrence 模型仿真对比图
Fig.5 Compare with Lawrence' simulation

表 1 简化 MB 偏振模型与 Lawrence 模型仿真对比表
Tab.1 Comparison between simplified MB model and Lawrence model

	20	30	45	60	80
0	7/7/0%	15/15/0%	30/30/0%	58/58/0%	91/93/2.1%
0.1	7/7/0%	15/15/0%	30/29/3.3%	58/56/3.4%	88/88/0%
0.2	7/7/0%	15/14/6.7%	30/28/6.6%	56/53/5.4%	80/83/3.75%
0.3	7/7/0%	15/14/6.7%	30/27/9.9%	50/50/0%	69/79/14.5%
0.4	7/6/14.2%	15/13/13.3%	26/26/0%	42/47/11.9%	60/74/23.3%
0.5	6/2/66.7%	12/12/0%	20/22/10%	33/44/33.3%	50/69/38%

表中数据每一单元格三个数据分别是该模型仿真偏振度值、Lawrence 模型仿真偏振度值和误差百分比。通过对比可知：该模型与 Lawrence 精确模型的误差基本在 10% 以下，且在入射角和粗糙度都较小时有较高的准确度。所以该模型能够准确有效地模拟物体表面反射偏振特性。通过对比也证明了含有两个经验参数的高斯分布可以很好地描述微面元分布情况，利用 Muller 矩阵和不同分量反射率的变化记录反射过程中偏振态的变化是可行的。最终，建立了一个基于简化 MB 模型的 pBRDF 模型，此模型可以计算任意 Stokes 矢量的光线以任意入射角、经过任意粗糙程度表面，在任意出射方向上的出射光的光强和偏振度，计算简单且具有良好的精确度。

参考文献：

- [1] Liu Dan, Zhao Yongqiang, Chen Chao, et al. Effects of spectral polarimetric BRDF by soil [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 293-298. (in Chinese)
- [2] Maxwell J R, Beard J, Weimer S, et al. Bidirectional reflectance model validation and utilization: technical report AFAL-TR-73-303 [R]. Michigan: Environmental Research Institute of Michigan, 1973.
- [3] Wang Zhen, Qiao Yanli, Hong Jin, et al. Detecting camouflaged objects with thermal polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 853-856. (in Chinese)
- [4] Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. *Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [5] Schott John R. *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing* [M]. Washington: SPIE, 2009: 63-106.
- [6] Han Jun, Liu Jun. *Engineering Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [7] Priest R G, Meier S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surface [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988-993.
- [8] Yang Wei, Gu Guohu, Chen Qian, et al. Method of target detection for infrared polarization image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2746-2751. (in Chinese)
- [9] Wolff M B, Lundberg A, Tang R. Image understanding from thermal emission polarization [C]// *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1998, IEEE, 1998: 625-631.