

文章编号 1004-924X(2015)08-2178-07

表面粗糙材质的复折射率反演

战永红, 刘 卿*, 杨 迪, 王雅萍

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 由于目标偏振特性研究中表面粗糙材质的复折射率很难准确反演, 本文对常用的 Vimal-Milo 反演法进行了改进。分析了粗糙表面的偏振二向反射特性, 指出了 Vimal-Milo 法采用的“偏振度-角度相关”反演模式的不足。然后, 提出了基于“相对偏振分量-角度相关”的反演方法, 推导出复折射率的反演公式, 并设计了对应的全局搜索算法。最后, 利用绿漆及铝板的偏振特性测试数据, 对提出的复折射率反演算法进行了验证, 并基于此对偏振二向反射特性进行了正向推演验证。反演数据表明: 使用本文提出的复折射率反演方法, 表面粗糙铝板的复折射率的反演精度较 Vimal-Milo 法有了显著提高, 实部和虚部与真值的误差均在 ± 0.01 以内, 且评价因子小于 0.07; 推演数据表明: 表面相对光滑的绿漆的偏振二向反射亮度的推演结果为 Vimal-Milo 法得到的均方根误差的 1/5, 与测试数据的误差在 0.01 以内。得到的结果证明本文所提复折射率反演方法可用于光滑及粗糙表面材质的复折射率反演。

关键词: 反演; 复折射率; 偏振二向反射分布函数; 偏振特性; 光学遥感

中图分类号: TB342; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2178

Inversion of complex refractive index for rough-surface objects

ZHAN Yong-hong, LIU Qing*, YANG Di, WANG Ya-ping

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: lcq@gxnu.edu.cn

Abstract: As the complex refractive index of a rough-surface object is difficult to be inverted precisely, the current Vimal-Milo method for inversion was improved in this paper. The characteristics of the polarimatic bidirectional reflection from the rough surface were analyzed, and the defects of current Vimal-Milo method with a mode of "polarization ratio - angle correlation" were pointed out. Then, an improved Vimal-Milo inversion method was proposed based on the model of "relative polarization component - angle correlation". The inversion formula for the complex index was derived and a global searching was designed. According to the measurement data of polarization characteristics from green paint and aluminum, the inversion algorithm for the complex index was verified and the polarimatic bidirectional reflection characteristics of materials were also verified by the forward deducing and inverting. The inversion data with proposed method show that the inversion precision of the complex index of rough-surface aluminum has more improved than that of the Vimal-Milo method and the parameter errors for real and imaginary parts are within ± 0.01 with the assessment index less-than 0.07. The inversion data by the forward deducing and inverting show that the error of radiance intensity of green

收稿日期: 2015-03-06; 修订日期: 2015-05-07.

基金项目: 国家安全重大基础研究资助项目 (No. 613225); 北京跟踪与通信技术研究所预研基金资助项目

paint has decreased 5 times that of Vimal-Milo method, and the difference from measuring data is within 0.01. These results all demonstrate that proposed inverting method can be used in the inversion for complex indexes of rough-surface objects and flat-surface objects.

Key words: inversion; complex refractive index; polarization Bidirectional Reflectance Distribution Function(pBRDF); polarized characteristics; optical remote sensing

1 引言

偏振反映了电磁波电场矢量的振动方向,是光横波特性的具体表现。光经过物质表面反射的过程中,除了产生能量、传输方向等变化外,还会产生与材质理化属性相关的偏振特性变化。目标的偏振特性可提供强度和光谱成像等不能包含的光学信息,能有效提高对目标的探测和识别能力,在对地遥感等领域具有良好的应用前景^[1-3]。

目标的偏振特性从宏观层面主要取决于目标的几何特征以及目标的材质;而从微观层面主要取决于材质表面的统计学面型属性及材质的复折射率。材质表面面型决定光线传输方向的分布特性;材质的复折射率决定光线的偏振特性。因此,复折射率是偏振特性产生的根本原因^[4-6],研究目标偏振特性首先需要研究和测量材质的复折射率。复折射率的测量方法主要包括透射法和反射法^[7]。透射法通过测量折射角来反演材质的复折射率,仅适用于透明物质;反射法通过测量布鲁斯特角或 p, s 偏振光的相位差来确定材质的复折射率,仅适用于表面绝对光滑的材质。Vimal 和 Milo 等人提出了利用偏振度随相位角的变化确定复折射率^[8-10]的方法,假定反射光全部为镜面反射光,忽略了朗伯反射等非镜面反射分量对偏振度的影响,因此该方法对表面粗糙材质的复折射率求解不准确。

针对 Vimal-Milo 法中存在的问题,本文提出了相对偏振分量-角度相关的复折射率反演方法,建立了复折射率的反演模型,开展了相关的实验进行对比验证。实验结果表明:本文提出的方法可有效避免朗伯反射等非镜面反射对复折射率反演精度的影响,提高了反演精度,特别是提升了具有粗糙表面的材质复折射率的反演精度。

2 问题描述

2.1 P-G 模型

本文及 Vimal-Milo 法反演复折射率都是基于材质表面偏振二向反射特性测试。偏振二向反射分布函数是在标量二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)

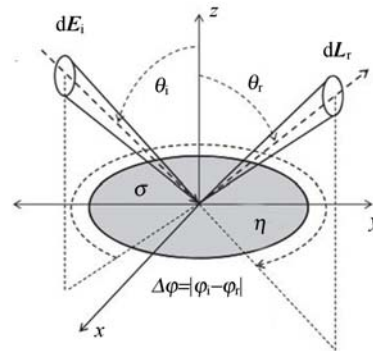


图 1 pBRDF 光路示意图

Fig. 1 Geometrical illustration of pBRDF

的基础上提出的,不仅能够表征散射光在上半空间的能量分布情况,还可描述散射光的偏振特性分布^[11]。其定义为沿材质表面出射方向的辐射亮度与入射方向的辐照度的比值(pBRDF 光路见图 1),数学表达式为^[12]:

$$\mathbf{F}_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi, \lambda) = d\mathbf{L}_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) / d\mathbf{E}_i(\theta_i, \theta_r), \quad (1)$$

式中: (θ_i, φ_i) 表示入射光方向, (θ_r, φ_r) 表示观测方向, λ 为入射光波长, \mathbf{F}_r 为 pBRDF, $d\mathbf{L}_r$ 表示在当前观察方向上的辐射亮度, $d\mathbf{E}_i$ 代表入射光的辐照度。由于入射和出射光可由 4×1 的 Stokes 矢量表示,所以 \mathbf{F}_r 为 4×4 的 pBRDF 矩阵。

通常采用非镜面反射分量和镜面反射分量分别对 pBRDF 进行建模。典型的代表有 2002 年 Priest 和 Germer 在 Torrance-Sparrow 标量 BRDF 模型的基础上提出的 P-G pBRDF 模

型^[13]。该模型由镜面反射分量(物理模型)和非镜面反射分量(经验模型)两部分组成。其 pBRDF 矩阵中 f_{jl} 的具体表达式为:

$$f_{jl}(\theta, \varphi, \varphi_r, \lambda) = f_{\text{spec}} + f_d = \frac{m_{jl}(\beta, n, \kappa) f_{\text{SO}} f_{\text{P}}}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} + f_d, \quad (2)$$

式中:下标 j 和 l 分别表示矩阵的行和列,取 $0 \sim 3$; f_{spec} 是镜面反射分量; f_d 是非镜面的反射分量,由粗糙表面漫反射得到,仅在 f_{00} 中出现; f_{SO} 和 f_{P} 是根据面型假设引入的阴影与遮挡函数以及微元元法线方向的概率分布函数; m_{ij} 是 Mueller 矩阵中的元素,是复折射率 n, k 以及入射和反射角的函数。P-G 模型的 Mueller 矩阵具有如下形式:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & 0 & 0 \\ m_{01} & m_{00} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{22} & -m_{23} \\ 0 & 0 & m_{23} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2 Vimal-Milo 法

基于 P-G 模型,当入射光为自然光时,经过材质反射后的光有:

$$\begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} S_0^i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = S_0^i \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{01} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: S_0^i 为无偏的入射光亮度; S_i^r 为反射光的亮度,下标 i 取 $0 \sim 3$ 。由 Stokes 矢量定义及公式(2)、(4)可得反射光的偏振度表达式为:

$$P(n, k, \beta) = \frac{f_{01}}{f_{00}} = \frac{\xi m_{01}}{\xi m_{00} + f_d} = \frac{S_1^r}{S_0^r}, \quad (5)$$

式中:

$$\xi = \frac{f_{\text{SO}} f_{\text{P}}}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r}. \quad (6)$$

Vimal-Milo 认为仅需考虑镜面反射分量的影响,于是反射光中漫反射分量 f_d 可忽略不计(即 $f_d = 0$),则有:

$$P(n, k, \beta) = \frac{S_1^r}{S_0^r} = \frac{m_{01}}{m_{00}}, \quad (7)$$

式中: S_0^r, S_1^r 为测量值, β 是入射角和反射角的函数。式(7)中仅有 n, k 两个未知数,因此 Vimal-Milo 法通过测量 2 个反射角上的偏振度,便可以实现对复折射率的反演。

由式(5)、(6)、(7)可知:当且仅当 $\xi m_{01} \gg f_d$, 即非镜面反射分量远小于镜面反射分量时, Vi-

mal-Milo 法才能达到较好的复折射率反演精度。事实上,真实目标材质的表面往往比较粗糙,若在不进行材料抛光处理的情况下完成复折射率的反演,需要尽可能地减少和避免非镜面反射光 f_d 的影响。

3 复折射率反演方法

3.1 基本思想

由 Vimal-Milo 复折射率反演的原理可知, S_0^r 中非镜面反射分量 f_d 是导致式(7)无法成立的原因。因此避免非镜面反射光的影响可考虑两种方法: f_d 分量的求解和避免使用包含 f_d 分量的变量。由于在不同角度下 f_d 分量可能不同,每引入一个角度便新增一个 f_d 值,因此求解 f_d 值很困难,本文主要考虑如何避免引入包含 f_d 的 S_0^r 。

当使用琼斯矢量表示光的偏振强度时有:

$$I = I_{\text{spec}} + I_d, \quad (8)$$

转化为 Stokes 矢量为(仅给出 S_0, S_1):

$$S_0 = (I_{\text{spec}} + I_d)_{(0^\circ, 0^\circ)} + (I_{\text{spec}} + I_d)_{(90^\circ, 0^\circ)}, \quad (9)$$

$$S_1 = (I_{\text{spec}} + I_d)_{(0^\circ, 0^\circ)} - (I_{\text{spec}} + I_d)_{(90^\circ, 0^\circ)}. \quad (10)$$

由 P-G 模型可知,非偏振分量是由粗糙表面漫反射导致的,因此是无偏振的,即:

$$I_d(0^\circ, 0^\circ) = I_d(90^\circ, 0^\circ). \quad (11)$$

将上式带入式(10)有:

$$S_1 = (I_{\text{spec}})_{(0^\circ, 0^\circ)} - (I_{\text{spec}})_{(90^\circ, 0^\circ)}, \quad (12)$$

S_1 仅与镜面反射分量相关,因此可用 f_{01} 与 S_1 的关系进行复折射率反演。

由公式(2)可知,散射光 S_1 对应 pBRDF 矩阵中的 f_{01}, f_{01} 为:

$$f_{01} = \frac{m_{01} f_{\text{SO}} f_{\text{P}}}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} = \frac{S_1^r}{S_0^i}. \quad (13)$$

类比偏振度求解公式,设

$$y(n, k, \beta) = \frac{f_{01}}{f_{01}} = \frac{S_1^r / S_0^i}{S_1^r / S_0^i} = \frac{S_1^r}{S_1^r}, \quad (14)$$

式中: f_{01}, S_1^r 表示选定的参考量,理论上可选择测试结果中的任意值。可见,当使用 S_1^r 作为参考量后, $y(n, k, \beta)$ 可取代偏振度 $P(n, k, \beta)$ 进行复折射率反演。

3.2 方程推导

f_{01} 表示散射光的线偏振分量(不包括非镜面反射分量),由 Fresnel 反射定律,线偏振分量可表示成 s 波与 p 波的反射率之差,即:

$$f_{01} \propto m_{01} = \frac{1}{2} |R_s - R_p|, \quad (15)$$

式中: R_s 和 R_p 分别是 s 波和 p 波的反射率,是材料复折射率 $\tilde{n} = n + ik$ 以及入射角等的函数。由 Fresnel 定律,有:

$$R_s = \frac{(A - \cos \beta)^2 + B^2}{(A + \cos \beta)^2 + B^2}, \quad (16)$$

$$R_p = R_s \cdot \left[\frac{(A - \sin \beta \tan \beta)^2 + B^2}{(A + \sin \beta \tan \beta)^2 + B^2} \right], \quad (17)$$

式中: A, B 为中间变量,计算公式如下:

$$A = \sqrt{\frac{\sqrt{C} + D}{2}}, \quad (18)$$

$$B = \sqrt{\frac{\sqrt{C} - D}{2}}, \quad (19)$$

$$C = 4n^2 k^2 + D^2, \quad (20)$$

$$D = n^2 - k^2 - \sin^2 \beta, \quad (21)$$

其中: β 是入射光束与微面元法线方向的夹角,由下式求得:

$$\cos(2\beta) = \cos(\theta_i) \cos(\theta_r) + \sin(\theta_i) \sin(\theta_r) \cdot \cos(\Delta\varphi). \quad (22)$$

$$y(n, k) = \frac{(A - \cos \beta)^2 + B^2}{(A + \cos \beta)^2 + B^2} \cdot \frac{A \sin \beta \tan \beta}{(A + \sin \beta \tan \beta)^2 + B^2} \cdot \frac{\Omega + \theta_N e^{-2\beta\tau}}{\Omega + \theta_N} \cdot \frac{e^{-\frac{\tan^2(\theta_N)}{2\sigma^2}}}{\cos^3(\theta_N)} \cdot \frac{\cos \bar{\theta}_i \cos \bar{\theta}_r}{\cos \theta_i \cos \theta_r}, \quad (27)$$

$$\frac{(\bar{A} - \cos \bar{\beta})^2 + \bar{B}^2}{(\bar{A} + \cos \bar{\beta})^2 + \bar{B}^2} \cdot \frac{\bar{A} \sin \bar{\beta} \tan \bar{\beta}}{(\bar{A} + \sin \bar{\beta} \tan \bar{\beta})^2 + \bar{B}^2} \cdot \frac{\Omega + \bar{\theta}_N e^{-2\bar{\beta}\tau}}{\Omega + \bar{\theta}_N} \cdot \frac{e^{-\frac{\tan^2(\bar{\theta}_N)}{2\sigma^2}}}{\cos^3(\bar{\theta}_N)}$$

式中仅 n, k 为待求未知参量,其它均为可求中间变量,因此确定一组 $\bar{\theta}_i, \bar{\theta}_r$ 后,多次改变 θ_i, θ_r ,利用最小二乘法可确定复折射率 n, k 。

3.3 算法设计

仅考虑入射面与观测面重合,即入射角与观测角的相对方位角 $\Delta\varphi = 180^\circ$ 的情况,保持入射角不变,此时函数 y 仅为复折射率 n, k 及观测角 θ_r 的函数,即有:

$$y_j(n, k, \theta_{rj}) = \frac{f_{01j}}{f_{01}} = \frac{S_{1j}^i}{S_1^i}, \quad (28)$$

式中: $j = 0, 1, 2, \dots, n$, f_{01j} 是观测角为 θ_{rj} 时的 f_{01} 值, f_{01} 为参考值。当测试数据组大于 3 时,上式为超定非线性方程,求解方法为最小二乘法,评价函数定义为:

$$z(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_j^R (y_j(n_i, k_i, \theta_{rj}) - \hat{y}_j(\theta_{rj}))^2}, \quad (29)$$

式中: $\mathbf{x} = [n, k]^T$ 为待求向量; $y_j(n_i, k_i, \theta_{rj})$ 为理论计算数据, $\hat{y}_j(\theta_{rj})$ 为实测数据。

式(2)中阴影与遮挡函数 f_{s0} 及微面元法线方向概率分布函数 f_p 分别是材料表面几何特征参数 $\tau, \Omega, \sigma, B_n$ 的函数^[14],其表达式分别为:

$$f_{s0}(\theta_N, \beta, \tau, \Omega) = \frac{\Omega + \theta_N e^{-2\beta\tau}}{\Omega + \theta_N}, \quad (23)$$

$$f_p(\theta_N, B, \sigma) = \frac{B_n e^{-\frac{\tan^2(\theta_N)}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2 \cos^3(\theta_N)}, \quad (24)$$

式中: θ_N 是微面元法线方向与表面平均法线的夹角。

$$\cos(\theta_N) = \frac{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}{2\cos(\beta)}. \quad (25)$$

将式(16)~(25)带入式(2)中有:

$$f_{01} = \frac{(A - \cos \beta)^2 + B^2}{(A + \cos \beta)^2 + B^2} \cdot \frac{A \sin \beta \tan \beta}{(A + \sin \beta \tan \beta)^2 + B^2} \cdot \frac{\Omega + \theta_N e^{-2\beta\tau}}{\Omega + \theta_N} \cdot \frac{B_n e^{-\frac{\tan^2(\theta_N)}{2\sigma^2}}}{8\pi\sigma^2 \cos^3(\theta_N)} \cdot \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r}. \quad (26)$$

将式(26)带入公式(13),有:

本文采用不需要计算导数的 Hooke-Jeeves 模式搜索算法,迭代计算最优解。模式搜索法的基本思想是搜索目标函数具有较小函数值的“山谷”,并力图使迭代产生的序列沿“山谷”走向逼近最优解^[15-16]。

4 实验及结果

4.1 实验及数据

实验对象为涂有深绿色涂层(功能涂层大约厚 0.1 mm),以及未涂涂层的均质铝板,分别作为表面相对光滑和粗糙材质的测试对象。为了能够提高测试精度,采用了标准漫反射板作为精度校验板。

光源采用溴钨灯,波段为可见光,能量稳定度优于 97%。散射光的偏振特性测试采用美国 Bossa Nova 公司的 SALSA 液晶偏振相机,该相机可在 R,G,B 三色波段上实现全偏振测量,线偏

振度、偏振角、圆偏振度的测量精度分别为 1.2%, 0.4° 和 1.0%。光学平台采用华中测控的二维转台, 转台的角位置精度均优于 $\pm 0.02^\circ$ 。

实验时, 将白光光源固定在光源支架 70° 位置(天顶角为 20°), 将二维转台观测臂旋转到相对方位角 180° 的位置并固定, 在 $40 \sim 70^\circ$ 天顶角每隔 5° 进行数据采集, SALSA 相机前置 R 波段滤光片, 增益设定为 22 dB。绿漆部分的实验采样数据如图 2 所示, 图中分别列举了绿漆 4 个角度下的 S_1 测试数据。

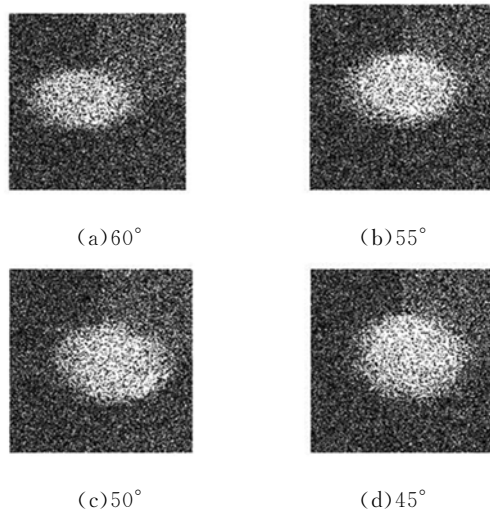


图 2 不同角度下绿漆表面 S_1 的采样数据

Fig. 2 Images of S_1 data of green paint's surface at different zenith angles

图中白色圆斑为入射光照射到绿漆样板上的光斑, 黑色部分为光斑以外部分。由于偏振相机采用的是逐点计算, 因此在黑色和白色部分都存在着“噪点”。为减小“噪点”的影响, 对相机视场中心即白色圆斑处 S_1 值的平均作为复折射率的反演数据, S_1 数据处理后的结果如表 1 所示, S_1 的数据为相机的灰度均值。

表 1 绿漆和铝板的 S_1 测量结果

Tab. 1 Measured S_1 data for green paint and aluminum plate

角度	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°
绿漆	37.7	47.8	61.2	78.6	102.1	135.0	184.0
铝板	82.2	104.1	132.1	168.6	217.7	285.8	387.1

4.2 复折射率反演

分别选择 $45^\circ, 55^\circ$ 的测试数据作为绿漆及铝板的参考值。将实验数据 S_1 带入公式(29)中进

行绿漆及铝板的复折射率反演, 并利用模式搜索法搜索最优解。再将实验测得的 S_1 及 S_0 等数据带入到公式(7)中, 利用 Vimal-Milo 法求解两种材料的复折射率。表 2 为两种方法获得的实验结果。

表 2 绿漆及铝板的复折射率反演实验结果

Tab. 2 Estimated complex indices of green paint and aluminum

材料	观测角	n	k	z_{\min}
本文	绿漆	1.37	0.34	0.07
方法	铝板	1.25	6.59	0.18
Vimal	绿漆	1.47	0.47	0.37
-Milo 法	铝板	5.02	7.14	1.26

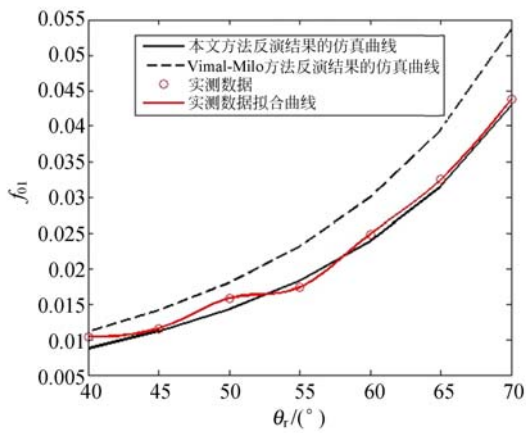
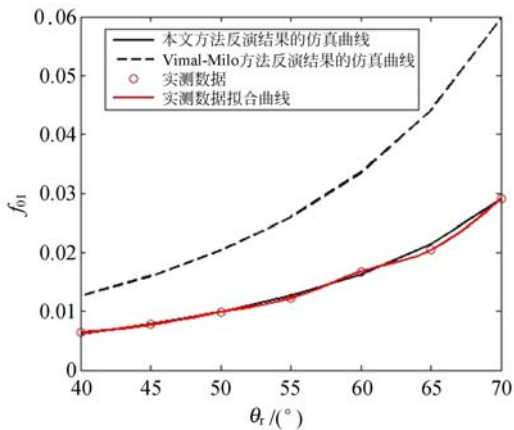
表 3 铝板不同波长下的复折射率反演实验结果

Tab. 3 Estimated results of aluminum at different wavelengths

入射光波长/nm	材料	n	k	z_{\min}
600	铝板	1.25	6.59	0.18
532		0.74	3.26	0.11
480		0.95	1.23	0.20

文献[8]中给出的铝板复折射率参考值为 $1.24 + 6.60i$, 由表 2 中实验结果可知, 使用本文提出的反演方法, 复折射率反演结果与真值的误差仅为 ± 0.01 , 相比于 Vimal-Milo 法精度有了显著的提高。评价因子 z_{\min} 代表带入反演的复折射率后模型的预测结果与测试数据的拟合程度, 也可体现反演结果的精度。对于绿漆, Vimal-Milo 法的 z_{\min} 为 0.37, 本方法为 0.07, 精度提高了 5.28 倍; 对于铝板, Vimal-Milo 法的 z_{\min} 为 1.26, 本方法为 0.18, 精度提高了 7 倍。对比两种方法的反演数据以及真值可知, 本文所述方法可明显地提高复折射率的反演精度。从表 3 中可知, 本文方法可获得不同波长入射光下铝板的复折射率反演, 适用性较好。

此外, 本文选用文献[17]中提供的测量数据对黑漆材料的复折射率进行了反演, 文献中给出的复折射率为 $1.40 + 0.40i$, 而本方法为 $1.39 + 0.41i$ 。该结果表明, 偏振度高、表面光滑的材质的反演结果具有趋同性, 进而证明了本方法的合理性。

图 3 绿漆 f_{01} 随观测角的模型仿真及实测曲线Fig. 3 θ_i dependent green paint's f_{01} curves in simulation and fitting with experimental data图 4 铝板 f_{01} 随观测角的模型仿真及实测曲线Fig. 4 θ_i dependent aluminum's f_{01} curves in simulation and fitting with experimental data

参考文献:

- [1] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学精密工程,2013,21(3):539-545.
LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(3):539-545. (in Chinese)
- [2] 张颖,赵慧洁,邢辉,等. 透射式旋转对称光学系统中的偏振像差[J]. 光学精密工程,2009,17(4):757-762.
ZHANG Y, ZHAO H J, XING H, *et al.*. Polarization aberrations of transmitting rotationally symmetric optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):757-762. (in Chinese)
- [3] KEREKES J, HART C, GARTLEY M, *et al.*. Characterization of material reflectance variation through measurements and simulation [J]. *SPIE*, 2010,7695(0P):1-11.
- [4] SAWYER M A, HYDE IV M W. Material characterization using passive multispectral polarimetric imagery [J]. *SPIE*,2013,8873(0Y):1-15.
- [5] 王霞,邹晓风,金伟其. 粗糙表面反射辐射偏振特性研究[J]. 北京理工大学学报,2011,31(11):1327-1331.
WANG X, ZOU X F, JIN W Q. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness

4.3 回归验证

将本文的反演方法及 Vimal-Milo 法的反演结果分别带入到公式(26)中进行正向推演,并将推演的数据与实测数据进行比较。图 3 是绿漆 f_{01} 仿真及实测曲线,图 4 是铝板 f_{01} 仿真及实测曲线。由图 3 和图 4 可知,本文反演结果的 f_{01} 仿真曲线与实测数据的拟合曲线有较好的一致性,绿漆的差值均方根为 0.05,铝板为 0.04;而使用 Vimal-Milo 法反演得到的 f_{01} 仿真曲线与实测数据拟合曲线的一致性较差,绿漆的差值均方根为 0.12,铝板为 0.21。本文方法得到的绿漆和铝板的回归数据精度较 Vimal-Milo 法分别提升了 2.40 倍和 5.25 倍。此外,由差值的均方根可以看出,本文方法对表面粗糙和相对光滑材质的复折射率的预测稳定性均优于 Vimal-Milo 法。

5 结论

本文基于 P-G 模型提出了一种“相对偏振分量-相位角”的复折射率反演方法。该方法不需引入非镜面反射分量,既适用于求解表面光滑材质的复折射率,又适用于表面较粗糙的材质,复折射率反演结果与参考值的误差均在 ± 0.01 之间,反演精度高、适用性广。

- objects [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(11):1327-1331. (in Chinese)
- [6] 马丽祥, 李范鸣, 牛继勇, 等. 基于复折射率的偏振模型及其应用[J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1138-1141.
- MA L X, LI F M, NIU J Y, *et al.*. Polarization model based on complex refractive index and its applications [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1338-1341. (in Chinese)
- [7] 李强, 杨瑞芬, 翟影, 等. 非近轴条件下无损测量毛细管管壁折射率[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 616-623.
- LI Q, YANG R F, ZHAI Y, *et al.*. Nondestructive measurement of refractive index of capillary in non-paraxial conditions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 616-623. (in Chinese)
- [8] THILAK V, CREUSERE C D, VOELZ D G. Estimating the complex index of refraction and view angle of object using multiple polarization measurements [J]. *IEEE*, 2006, 1-4244-0785-0/06:1067-1071.
- [9] THILAK V, VOELZ D G, CREUSERE C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30):7527-7536.
- [10] HYDE IV M W, SCHMIDT J D, CAIN S C. Determining the complex index of refraction of an unknown object using turbulence-degraded polarimetric imagery [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(12):126201.1-126201.11.
- [11] GONG L, WU ZH S, HOU H L. Polarized bidirectional reflectance distribution function for optical substrate and different films [J]. *SPIE*, 2012, 8417(0J):1-6.
- [12] 刘卿, 战永红, 杨迪, 等. 粗糙表面偏振二向反射特性建模方法研究[J]. *飞行器测控学报*, 2014, 33(4):354-359.
- LIU Q, ZHAN Y H, YANG D, *et al.*. Methods of modeling of polarized BRDF for rough surfaces [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2014, 33(4):354-359. (in Chinese)
- [13] PRIEST R G, GERMER T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: Theory and measurements [C]. *In Proceeding of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specially Groupon Passive Sensors*, 2000, 1:169-181.
- [14] SCHOTT J R. *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing* [M]. Washington: SPIE Press, 2009.
- [15] 王丽, 孙晓刚. 基于模式搜索的光谱消光粒径分布反演算法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3):618-622.
- WANG L, SUN X G. Research on pattern search method for inversion of particle size distribution in spectral extinction technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(13):618-622. (in Chinese)
- [16] 侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 斯托克斯椭偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1915-1922.
- HOU J F, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1915-1922. (in Chinese)
- [17] GARTLEY M G. *Polarimetric Modeling of Remotely Sensed in the Thermal Infrared* [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2007.

作者简介:



战永红(1967—),男,吉林省吉林人,研究员,硕士生导师,1988年于郑州大学获得学士学位,1991年于北京跟踪与通信技术研究所获得硕士学位,2008年于国防科技大学获得博士学位,主要从事目标光学特性、光学测量等方面的研究。E-mail: zhanyonghong@sina.com

通讯作者:



刘卿(1989—),男,山东枣庄人,硕士研究生,助理工程师,2012年于上海交通大学获得学士学位,主要从事目标光学偏振特性方面的研究。E-mail: qing_liu_0812@126.com