

光学系统的杂光计算分析

高 志 山

摘要: 探讨了光学系统杂光分析方法, [提出了鬼像判别依据, 在修改小镜面散射理论中几何遮挡因子 (Geometrical Masking-shadowing Factor) 基础上, 抽象出光学系统中表面粗糙度 $\sigma_m/\lambda \geq 1.0$, 的表面双向反射分布函数 (BRDF) 模型, 同时应用矢量微扰理论给出表面粗糙度 $\sigma_m/\lambda < 1.0$ 的BRDF模型, 并编制杂光分析程序

一、引 言

光学系统的杂光分析在国外早就引起了光学设计研究人员的充分重视, 并且已经研制出大型的分析软件^[1]。近几年, 国内专家们也对此有着浓厚的兴趣, 但是研究工作主要集中在研制杂光测定仪上^[2], 我们主要致力于光学系统的杂光预见研究。

首先, 看一下杂光能量传输基方程:

$$\phi_c = \phi_s \cdot BRDF_s \cdot \Omega_{sc} \cdot \cos\theta_c \quad (1)$$

其中,

ϕ_c ——接收器上的光功率

ϕ_s ——杂光源光功率

$BRDF_s$ ——杂光源表面双向反射分布函数

Ω_{sc} ——从杂光源点观察接收器时所张立体角

θ_c ——杂光传到接收器上入射角

如果杂光传播路径中, 只有一个杂光源存在, 那么接收器就是像面, 如有多个杂光源, 则多次应用方程式 (1)。

由此, 进行杂光分析要做下列工作。

确定杂光源, 计算 Ω_{sc} , ϕ_s 。

建立杂光源表面BRDF, 计算模型

二、寻找杂光源、计算 Ω_{sc} ϕ_s , 鬼像判别依据

1. 我们的思想方法: 应用从像面往回看的方法, 来发现被研究视场内看得见的区域, 这些区域是产生杂光的要害部位。然后, 对给定物视场进行正向光路追迹, 找到光学系统中的照亮区, 如果直接照亮区与探测器看得见区域有所重合, 那么重叠区将是严重危害光学系统性能的杂光源。

实现的方法是进行逆向和正向杂光光线追迹。

2. 杂光光路追迹技术。

用高斯光学近轴近似法确定光学系统的物像关系，用真实光线光路追迹方法，去跟踪杂光的传播路径。

真实光线光路追迹过程中遇到光学元件时，采用通常《光学设计》中真实光线光路追迹公式，遇到非光学元件时，只需在把非光学元件当成标准反射镜面的基础上予以修正。

零级追迹：光线在非光学面上满足反射定律：

$$\vec{p} = \vec{p} + e \vec{r} \quad (2)$$

$$\vec{r}' = \vec{r} - 2(\vec{r} \cdot \vec{p})\vec{p} \quad (3)$$

说明： \vec{p} 、 \vec{p}' 分别是入射光线上一点和反射光线上一点的位置矢量，一般 \vec{p} 是反射面与入射光线之交点。 \vec{r}' 与 \vec{r} 是反射光线与入射光线单位方向矢量 e 是有向线段 (pp') 之长。

实际上，光线在非光学表面上发生散射，零迹光线追迹，只能给出杂光能量主要传播方向，如要求细致的像面能量分布，则要做一级或更高级杂光追迹。

一级追迹或高级追迹：即让杂光源辐射光源坐标作一偏移，这时，像面上的照亮区也要有一增量，能量分布细节可被模拟。公式为

$$\vec{\Delta p} = \vec{\Delta p} + e \vec{\Delta r} + \Delta e \vec{r} \quad (4)$$

$$\vec{\Delta r}' = \vec{\Delta r} - 2(\vec{r} \cdot \vec{p})\vec{p} - 2(\vec{r} \cdot \vec{p}) \cdot \vec{\Delta p} \quad (5)$$

3. 计算 $\Omega_{i,c}$ 、 ϕ_c

在杂光光路追迹基础上，获得杂光源区域大小 A_i 及位置，还有光功率 ϕ_i 。然后经过逆向光线追迹，得到像面上照亮区域或接收器在杂光源空间的像，这样

$$\Omega_{i,c} = \frac{1}{A_c} \sum_{i,j} \frac{m^2 dA_{i,i} dA_{c,j} \cos\theta_{i,i} \cos\theta_{c,j}}{D_{i,j}^2} \quad (6)$$

考虑到杂光源与接收器之间那部分光学系统的光能透过率 $\tau_{i,j}$ ，接收器上的杂光功率

$$\phi_c = \frac{\phi_i}{A_c} \sum_{i,j} \frac{m^2 q A_{i,i} dA_{c,j} \cos\theta_{i,i} \cos\theta_{c,j}}{D_{i,j}^2} BRDF_{i,j} \tau_{i,j} \quad (7)$$

当杂光源直接传播到像面上时， ϕ_c 就是像面上杂光量。

说明： i, j 是杂光源与接收器像上细分小面元对序列号， $D_{i,j}$ 是两小面元之间距离， m 是接收器在杂光源空间成像的放大率， $dA_{i,i}$ 、 $dA_{c,j}$ 就是小面元面积， $\theta_{i,i}$ 、 $\theta_{c,j}$ 是小面元中心点连线与小面元法线夹角， $BRDF_{i,j}$ 是杂光源小面元在接收器小面元 $dA_{c,j}$ 方向的反射分布函数值。

当 $D_{i,j} = 0$ ，即接收器在杂光源空间的像与杂光源重叠时，这时将产生能量集中，也即产生鬼像。

三、杂光源表面 BRDFs 建立的理论基础

光学系统的受光面，其粗糙程度 σm 跟波长相比较，不外乎两种粗糙表面，一种是 σ_m/λ

$\sigma_m/\lambda \gg 1.0$ 的非光学表面, 例如筒内壁, 光栏面, 厚透镜边缘面等; 一种是 $\sigma_m/\lambda \ll 1.0$ 的光学镜表面。我们主要着手建两种表面在可见光波段的分析模型。

1. $\sigma_m/\lambda \gg 1.0$ 的较粗糙表面散射理论

在这样的粗糙量级下, 表面上一点与另一点之间, 对光线的相互遮掩效应将对光的散射分布起着很重要的影响, 也使理论研究比较复杂, 小镜面散射理论能直观地描述这种表面的散射过程, 但是历来的研究者们, 很少有人较好地处理表面的遮挡效应。我们用条件概念来处理遮挡效应, 获得了成功。

(1) 理论想法

我们假设, 粗糙表面有许许多多的小镜状平面 (Mirror-facets) 组成。小平面在单位面积内个数是按其坡度角来分布的。对入射光线方向角为 ψ , 出射光线方向角 (θ, ϕ) 的一组光线框架对散射光功率有贡献的小平面的坡角 α , 及其空间取向, 由 (ψ, θ, ϕ) 共同确定。对于各向同性表面, 小平面个数密度分布函数, 如设为 $P(\alpha)$ 那么 $P(\alpha)$ 是一高斯正态分布。粗糙表面对入射光功率的散射由两部份组成: 即小平面对光的镜反射分量与被遮挡的光在小平面内多次反射形成的漫反射迭加而成。我们引用一个 g 因子来衡量这两种分量的权重。

漫反射分量满足朗伯余弦定律。而入射到粗糙表面的光功率要经过表面涅非耳反射系数 $F(\psi, \hat{n})$, 与表面遮挡效应的衰减。其中 \hat{n} 是表面介质复折射率。

表面遮挡效应的衰减用遮挡函数 $S[\psi, \theta, \phi | \sigma_m]$ 来表示, 它是入射光线与出射光线方向角 (ψ, θ, ϕ) , 及表面粗糙度 σ_m 的函数。它蕴含下列意义: 入射光线能够照明由 (ψ, θ, ϕ) 确定的小平面的几率与反射光线不被其它小平面遮挡的几率。

可以表示成:

$$S(\psi, \theta, \phi | \sigma_m) = R(\psi, \alpha, \sigma_m) \cdot R(\theta, \alpha, \sigma_m) \quad (8)$$

其中 $R(\psi, \alpha, \sigma_m)$ 可以用条件概率导出

我们引用条件概率导出的遮挡函数使理论结果能进一步解释, 逆向散射大角时向零下降的趋势, 向前大角散射迅速下降为零的趋势, 而以前的小镜面反射理论则得不出这些与实验结果 (参考文献^[2]) 相吻合的结论。

(2) 理论结果

粗糙表面的双向反射函数归一化形式为:

$$\frac{P(\psi, \theta, \phi)}{P(\psi, \psi, \phi)} = \frac{gF(\psi, \hat{n}) \cdot S(\psi, \theta, \phi | \sigma_m) P(\alpha) + \cos\psi}{gF(\psi, \hat{n}) \cdot S(\psi, \psi, \sigma_m) + \cos\psi} \quad (9)$$

$F(\psi, \hat{n})$ —— 非涅耳反射系数

ψ' —— 小镜面上微观入射角, 它由 (ψ, θ, ϕ) 共同确定

(θ, ϕ) —— 光线出射方向角

\hat{n} —— 粗糙表面材料复折射率

g —— 权重因子, 它与表面粗糙度有关。 $\sigma_m/\lambda \ll 1.0$ 的光学镜表面散射分布函数。

这样的表面引起的遮挡效应可以忽略。

对于一个介质平面, 表面各向同性, 其介电常数为 $\epsilon(\omega)$, 设表面高度分布函数为 $z = \zeta(x, y)$ 那么其对于光波 (波长为 λ , 角频率为 ω , 波数为 $k = 2\pi/\lambda$), 双向分布函数为两个因

子之积:

$$BKDF = [OF] \cdot [SF] \quad (10)$$

x, y 为表面平均面的坐标。

下面我们分别说明这两个因子的意义及导出:

光学因子 [OF]

[OF] 为光学因子 Optical Factor 的缩写。它只与表面的材料, 光线参量有关, 与光波波长有关, 其形式为:

$$[OF] = \frac{k^4}{\pi^2} F_1[\psi, \theta, \phi | e(\omega)] \quad (11)$$

说明 (ψ, θ, ϕ) 为光线方向角, 分别描述入射光线和出射光线。

$F_1[\psi, \theta, \phi | e(\omega)]$ 为光波经表面散射后的偏振函数, 在特殊情形方位角 $\phi = 0$, 同时 $\psi = \theta$ 时, F_1 简化为菲涅耳系数 $F(\psi, \hat{n})$ 。光学因子 [OF] 可以通过矢量微扰理论解带有边界条件的 Maxwell 方程获得参考文献^[3]。

表面因子 [SF]

[SF] 是 Surface Factor 的缩写, 它是描述表面散射特征的物理量, 是对表面高度函数 $z = \zeta(x \cdot y)$ 进行频谱分析后得到的功率谱密度函数, 它的形式为:

$$[SF] = C[k(\sin\theta - \sin\psi)] \quad (12)$$

可以直接从表面高度函数 $z = \zeta(x \cdot y) = \zeta(\vec{R})$ 导出, $\vec{R} = (x \cdot y)$ 是平面坐标的矢量表示:

$$C(G) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A} \left| \int_A \int_A z(\vec{R}) \cdot \overline{e^{i \vec{G} \cdot \vec{R}}} d^2A \right|^2 \quad (13)$$

求 (11) 式时只须把 $G = |\vec{G}| = k(\sin\theta - \sin\psi)$ 代入 (12) 即得。因此 [SF] 直接与表面的详细结构有关。对高斯型表面, 功率谱密度函数可以导出:

$$C(G) = \pi \sigma_m^2 a^2 e^{-\frac{a^2}{4} G^2} \quad (14)$$

a 为表面的横向粗糙度——自相关长度。

现在广泛使用的, 通过测量表面积分散射 TIS 来获得表面粗糙度的实验方法, 就是基于这样的理论。

四、结 论

本文给出了杂光分析的思路和鬼像判别方法, 导出了杂光源的计算模型, 在给出非光学面的散射光路模拟之后, 杂光分析程序的建立条件已经具备。

参 考 文 献

- [1] Janet S. Fender; Proc. SPIE, 257, 1980
- [2] Torrance, K. and Sparrow, E.; J. O. S. A, 57, 1105(1967)
- [3] A. A. Maradudin and D. L. Mills; Phys. Rev., B11, No. 4, 1975 11

Stray Light Analysis of Optical System

Gao Zhishan

Abstract

In this paper, we discuss the techniques of stray light analysis in optical system when the ghost image happens. In the meantime, two different surface theories are given, they can describe surface scattering characteristics, which are typical in optical system. The first is correctly accounting for shadowing-masking, which based on mirror-like facets reflection theory, with surface roughness small compare to wavelength. The second is a rigorous theory which is based on vector-perturbation theory. Then, the utility of these two models of stray light calculations is discussed.