

适合在微机上使用的杂光分析方法*

李德熊 闫达远

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

提 要

提出了一种适用于微机条件的杂光分析方法,用接近大型杂光分析软件的分块计算方式计算主反射镜的一次散射、遮光筒-主镜的二次散射以及筒边的衍射散射,可用于估计遮光完善光学系统的杂光水平.实例计算表明,分析结果十分近似大型软件 APART 的结果.

关键词 杂光分析, 杂散辐射, 辐射散射.

1 引 言

许多光学系统(例如星相机)常常设计用于在视场外有极强光源(例如太阳)的条件下探测微弱的信号,光学系统和遮光系统的设计,要求将视场内的杂光降低到一个极低的水平.例如 Bendix 星传感器^[1],视场外 40°处的太阳(它的星等是-26.7等)在像面上造成的杂光水平只有四等星照度的五分之一,即是太阳本身亮度的 10^{13} 分之一.

评价一个传感器的杂光特性一般可用二种方法^[2],即:制成样机测试法和计算分析法.大型杂光分析计算软件(例如采用确定性算法的 APART/PADE^[3]和采用随机算法的 GUERAP III^[4])具有许多计算功能,适用于各种复杂光学系统.但是它们需要在大型快速计算机上运行.

Greynolds^[5]在 APART/PADE 中所用基本公式的基础上,提出了一种适用于遮光完善光学系统的简化计算方法. Bamberg^[6]整理并补充了文献[5]的算法.这个算法(称为 Mini-Apart)只需用可编程的计算器即可运行.但是,从文献[5]和文献[6]中所给出的计算实例可以看到,由于模型过分简化,估算杂光水平平均低于用大型软件计算的结果,预测结果是过分乐观的.鉴于微机的普及,完全有可能将模型考虑得稍为复杂一些,使它更加接近大型软件的模型,同时又能在微机上方便地运行.本文就是试图完成这样一个任务.

2 计算方法

与文献[5]和[6]一样,本文讨论的光学系统的基本结构如图 1 中所示.

2.1 基本方程

计算杂光的出发点是任意二个面元间的辐射能量传递关系的基本方程(图 2)^[7]

收稿日期:1992年7月29日;收到修改稿日期:1992年10月19日

* 国家教委高校博士点专项科研基金资助课题

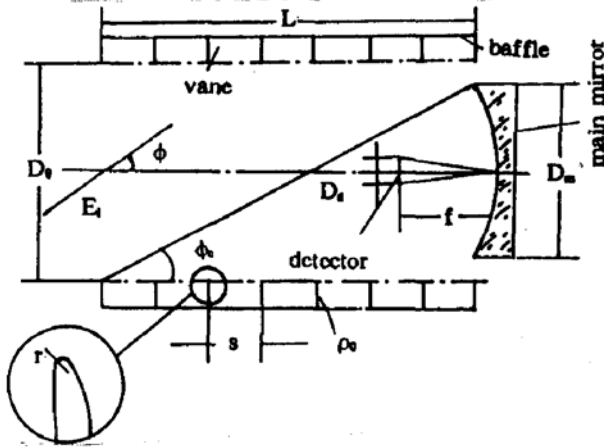


Fig. 1 Basic configuration of optical system

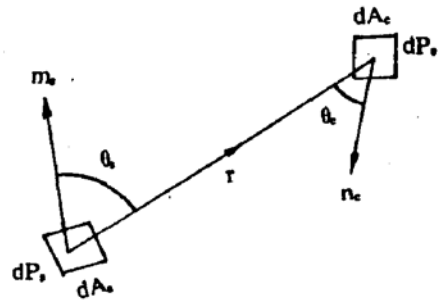


Fig. 2 Power transfer from surface element dA_s to dA_c .

$$dP_c = dP_s \cdot BRDF \cdot GCF \tag{1}$$

其中 $dP_s = E_s \cdot dA_s$, $BRDF$ 为面元 dA_s 的双向反射率分布函数, 对于朗伯表面的 dA_s , 有 $\rho_s = \pi \cdot BRDF$. 几何构成因子 GCF 是面元 dA_c 对面元 dA_s 的投影立体角,

$$GCF = d\Omega_s \cdot \cos \theta_s = \frac{dA_c \cos \theta_c \cos \theta_s}{r^2},$$

它与角系数^[8]之间有关系 $F_{sc} = GCF/\pi = dA_c \cos \theta_c \cos \theta_s / \pi r^2$. 因此, (1) 式可以改写成

$$dP_c = dP_s \cdot \rho_s \cdot F_{sc} \tag{2}$$

在一定 φ 角下进入遮光筒的辐射通量 P_i 为

$$P_i = E_i \pi D_0^2 \cos \varphi / 4. \tag{3}$$

在计算时, 因需要估计系统消杂光的能力, 只需得到相对的衰减倍数, 故可假设照度 $E_i = 1$.

2.2 主反射镜的散射

主反射镜的散射表面是极光滑的抛光表面, 它对任一方向入射能量的散射分布集中在其镜反射方向附近. 文献[5]中采用了 Harvey^[9] 通过分析实验结果得出的关系式:

$$\rho_m(\theta_i, \theta_0) = \pi \cdot b \cdot [100 |(\cos \theta_i + \cos \theta_0)|]^m, \tag{4}$$

式中 θ_i, θ_0 分别为入射和散射方向与散射表面之间的夹角, b 和 m 为由表面性质决定的常数. 文献[5]的模型中将散射光路简化为如图 3(a) 所示. 无论是直射到镜面上的平行光束, 还是经遮光筒壁散射后的漫射光束, 均假设以一个入射角 θ_i 射到反射镜的中心, 随后沿光轴方向散射到探测器. 因此(4) 式中可以用 $\theta_i = \pi/2 - \varphi$ 和 $\theta_0 = \pi/2$ 代入, 将它改写成

$$\rho_m = \pi b (100 \cdot \sin \varphi)^m, \tag{5}$$

由于两个面元互相平行, 角系数表达式中的 $\theta_s = \theta_c = 0$, 主反射镜到探测器的角系数简化成

$$F_{md} = dA_d / \pi f^2 = \Omega_d / \pi. \tag{6}$$

这样的简化显然只有当 φ 角很小时才比较近实际. 实际情形应该如图 3(b) 所示. 显然有

$$\theta_i = \pi/2 - \varphi - \omega, \quad \theta_0 = \pi/2 - \alpha,$$

式中 $\omega \approx \sin^{-1}(y/2f)$, $\alpha = \sin^{-1}[(f/r_0) \sin \omega]$, 而 r_0 则由余弦定律并化简后得

$$r_0 = f \sqrt{5 - 4 \cos \omega}. \tag{7}$$

可见, θ_i 与 θ_0 除与 φ 角有关外, 还随 y 而异. 同时, 从主镜到探测器的角系数 F_{md} 中的 θ_s 和 θ_c 也应随主镜面元法线方向的变化而异. 由图 3(b), 结合图 2 中对 θ_s 和 θ_c 的定义, 显然有 $\theta_s = \alpha, \theta_c$

$= \omega + \alpha$. 本文考虑了这一实际情况, 采用的简化算法是, 将受到直接照射的部分镜面(这部分面积随 φ 角增大而沿图面上移, 当 φ 大于一定值时, 主镜中心完全没有辐射照射) 或受到遮光筒散射辐射照射的整个镜面分割成与图面相垂直的若干窄条面元 ΔA_m , 分别以它们的中心作为计算点, 按上述各式求其 ρ_m 和 F_{md} , 再按(2) 式求得该面元最后散射到探测器的能量, 最后求其总和(Pd_1).

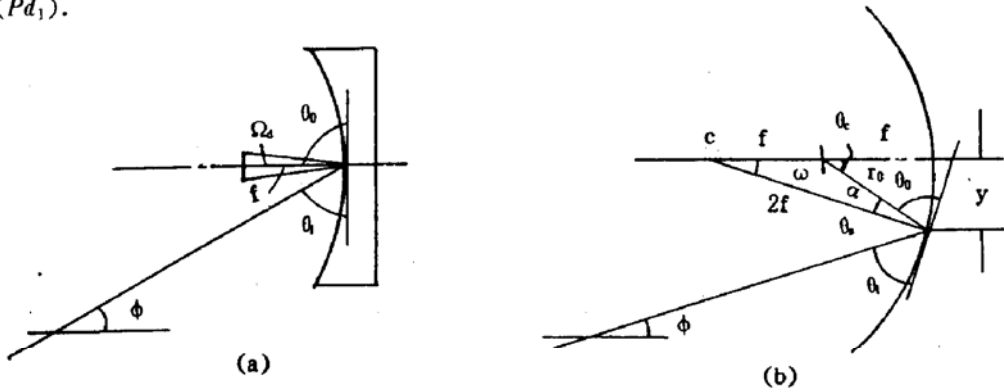


Fig. 3 Geometry of main mirror scattering path

2.3 遮光筒-主镜的二次散射

尽管 Breault^[2] 认为将遮光筒内表面假设成朗伯表面这一点要十分谨慎, 但考虑到实际分析计算的可能性, 绝大多数杂光分析模型中仍作如是假设, 文献[5]、[6]和本文也不作例外考虑. 文献[5]模型中将遮光筒的散射光路简化成能量集中在被照射表面的中心(离筒边 $l/2$ 处) 出发, 然后如前节所述, 假设以一根光路按 β 角的方向散射到主镜镜面的中心(图 4(a)). 于是遮光筒到主镜的角系数便简化成

$$F_{tm} = \frac{\cos \beta \sin \beta}{\pi (r')^2} \cdot A_m \tag{8}$$

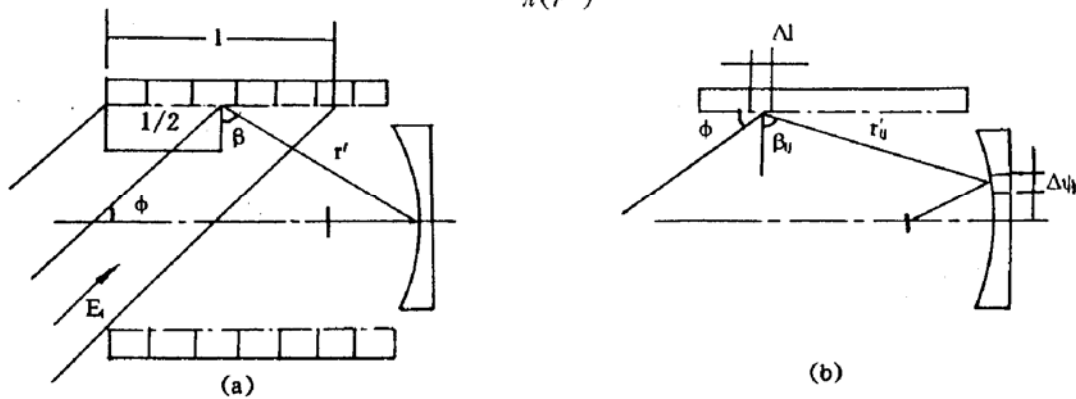


Fig. 4 Geometry of baffle-mirror scattering path

本文同样弃去了这种过分简化的模型, 而将接受照射的遮光筒的面积沿长度 l 方向分割成若干面元 ΔA_i , 同时将整个主镜面积也类似前节分割成若干面元 ΔA_m (图 4(b)). 对于每一个遮光筒的面元 (ΔA_i), 分别依次对各个主镜面元 (ΔA_m)_j 求其 β_{ij} 和 r'_{ij} , 代入类似(8)式的式子

$$(F_{tm})_{ij} = \frac{\cos \beta_{ij} \cos (\beta_{ij} + \omega_{ij})}{\pi (r'_{ij})^2} \cdot (\Delta A_m)_j \tag{9}$$

当遮光筒内没挡光环时, $\rho_i = \rho_0$. 当遮光筒内设置挡光环时, 按类似文献[5]中的讨论.

$$\rho_t = \rho_s + \rho_e + \rho_d, \quad (10)$$

式中 ρ_s 为经挡光环内壁二次散射的等效反射率, ρ_e 为挡光环圆弧半径为 r 的边缘散射的等效反射率, ρ_d 为挡光环边缘衍射效应的等效反射率. 但这些系数的相应计算公式^[5,6]中均需将各面元相对应的入射角和散射角值代入.

按基本公式(2)式求得由面元(ΔA_i)传递到面元(ΔA_m)的散射能量之后,再按前节中的考虑,求由面元(ΔA_m)传递到传感器的散射能量.最后求其总和(Pd_2).至于遮光筒边缘衍射造成的杂光(Pd_3),仍按文献[5]中方法计算.

3 计算实例和讨论

由于文献[6]的实例中没有给出结构参数,因此只能用文献[5]中实例的结构参数进行运算,以比较估算的杂光水平.这些参数是:遮光筒: $D_0 = 1.2 \text{ m}$, $L = 3 \text{ m}$, $S = 0.3 \text{ m}$, $r = 0.1 \text{ mm}$, $\rho_0 = 0.01$;主反射镜: $D_m = 1.0 \text{ m}$, $f = 1.5 \text{ m}$;探测器: $D_d = 0.1 \text{ m}$;以及 $b = 0.001$, $m = -1.0$, $\lambda = 10 \mu\text{m}$ (波长入用于衍射计算公式中).

按照文献[5]中的公式计算的结果列于表1,它与文献[5]中所给出的曲线吻合.分析表1中的结果,可以看到,直接照射主反射镜的辐射是探测器的最大杂光源.随着 φ 角的增大, P_{d1} 迅速减小,而遮光筒的一次散射(无挡光环时)成为不可忽视的杂光贡献.当 $\varphi \geq \varphi_c$ 时(见图1, $\varphi_c = \text{tg}^{-1}[(D_0/2 + D_m/2)/L] = 20^\circ 13'$),外来辐射不再能直接照射到主反射镜.这时杂光中占主导地位的便是遮光筒-主镜的二次散射了.同时也可看到,要满足我们在第一节里所提到过的 10^{-13} 量级,只有采用带有挡光环的遮光筒才有可能实现.相比之下,由于筒边衍射造成的杂光 P_{d3} 要比遮光筒的 P_{d2} 小好几个数量级.

Table 1 Results calculated by approximate formulas in [5]

φ	P_i	P_{d1}	P_{d2}		P_{d3}	ΣP_d	
			with vanes	without vane		with vanes	without vane
10	1.114	0.707×10^{-7}	0.804×10^{-12}	0.194×10^{-10}	0.571×10^{-14}	0.707×10^{-7}	0.707×10^{-7}
20	1.063	0.147×10^{-9}	0.360×10^{-12}	0.320×10^{-10}	0.735×10^{-16}	0.147×10^{-9}	0.179×10^{-9}
30	0.979	0	0.153×10^{-12}	0.194×10^{-10}	0.967×10^{-16}	0.153×10^{-12}	0.194×10^{-10}
40	0.866	0	0.782×10^{-13}	0.131×10^{-10}	0.736×10^{-16}	0.782×10^{-13}	0.131×10^{-10}
50	0.727	0	0.443×10^{-13}	0.936×10^{-11}	0.488×10^{-16}	0.444×10^{-13}	0.936×10^{-11}
60	0.565	0	0.244×10^{-13}	0.650×10^{-11}	0.264×10^{-16}	0.244×10^{-13}	0.650×10^{-11}
70	0.387	0	0.117×10^{-13}	0.407×10^{-11}	0.802×10^{-17}	0.117×10^{-13}	0.407×10^{-11}
80	0.196	0	0.391×10^{-14}	0.192×10^{-11}	0.609×10^{-16}	0.391×10^{-14}	0.192×10^{-11}
85	0.099	0	0.153×10^{-14}	0.932×10^{-12}	0.196×10^{-16}	0.155×10^{-14}	0.932×10^{-12}
87	0.059	0	0.824×10^{-15}	0.552×10^{-12}	0.537×10^{-16}	0.877×10^{-15}	0.552×10^{-12}
90	0	0	0.167×10^{-15}	0.131×10^{-16}	0.135×10^{-14}	0.135×10^{-14}	0.137×10^{-14}

现在再来分析比较用本文的模型计算的结果和上述文献[5]的结果.直接照射部分($\varphi \leq \varphi_c$)的结果如表2中所示.根据表2中的数据所画的曲线则如图5所示.由于文献[5]中只给出用其本身公式计算的结果曲线以及用 APART 软件计算的结果曲线,而未给出具体数据,因此无法定量地判断本文公式如何优于文献[5]的公式.但图5中两曲线上下交岔的关系,与文献

[5]中给出的 Mini-Part 和 APART 两曲线的交岔关系极其相似. 因此可以断言本文算法的结果更为接近用 APART 软件的计算结果.

Table 2 Comparison of P_{d1} calculated by the formulas in this paper with the results of [5]

φ (°)	Author's results	Results of [5]	φ (°)	Author's results	Results of [5]
2	0.4974×10^{-6}	0.7802×10^{-6}	14	0.2646×10^{-7}	0.2411×10^{-7}
4	0.2648×10^{-6}	0.3359×10^{-6}	16	0.1303×10^{-7}	0.1176×10^{-7}
6	0.1707×10^{-6}	0.1878×10^{-6}	18	0.4359×10^{-8}	0.4079×10^{-8}
8	0.1143×10^{-6}	0.1142×10^{-6}	20	0.6405×10^{-10}	0.1471×10^{-9}
10	0.7495×10^{-7}	0.7072×10^{-7}	22	0	0
12	0.4629×10^{-7}	0.4275×10^{-7}			

表 3 中列出了用本文中的公式计算得到的全部结果. 图 6 中则画出了表 1 和表 3 中两组 ΣP_d 的曲线. 同样可以看到, 本文计算的结果更加接近用 APART 软件的计算结果.

Table 3 Results calculated by formulas in this paper

φ (°)	P_i	P_{d1}	P_{d2}		P_{d3}	ΣP_d	
			with vanes	without vane		with vanes	without vane
10	1.114	0.749×10^{-7}	0.910×10^{-11}	0.265×10^{-10}	see Table 1	0.749×10^{-7}	0.750×10^{-7}
20	1.063	0.640×10^{-10}	0.114×10^{-11}	0.474×10^{-10}		0.652×10^{-10}	0.111×10^{-9}
30	0.979	0	0.197×10^{-12}	0.227×10^{-10}		0.197×10^{-10}	0.227×10^{-10}
40	0.866	0	0.908×10^{-13}	0.152×10^{-10}		0.909×10^{-13}	0.152×10^{-10}
50	0.727	0	0.535×10^{-13}	0.114×10^{-10}		0.506×10^{-13}	0.114×10^{-10}
60	0.565	0	0.310×10^{-13}	0.832×10^{-11}		0.310×10^{-13}	0.832×10^{-11}
70	0.387	0	0.155×10^{-13}	0.552×10^{-11}		0.155×10^{-13}	0.552×10^{-11}
80	0.196	0	0.536×10^{-14}	0.278×10^{-11}		0.536×10^{-14}	0.278×10^{-11}
90	0	0	0.225×10^{-19}	0.105×10^{-16}		0.135×10^{-14}	0.137×10^{-14}

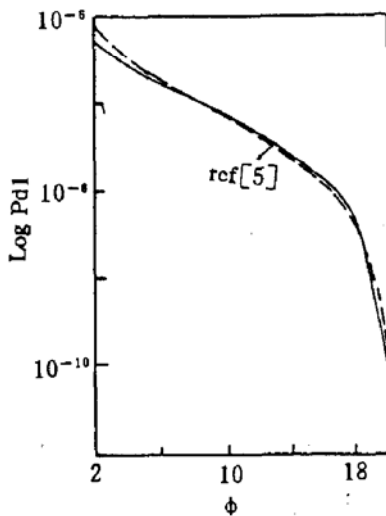


Fig. 5 P_{d1} 's comparison with ref [5]

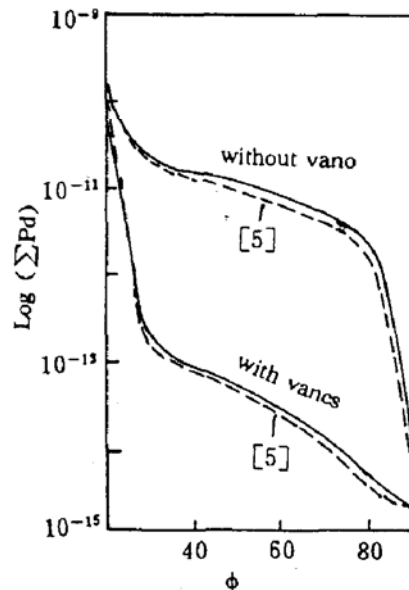


Fig. 6 P_d 's comparison with ref [5]

4 结 论

设计视场外有极强光源条件下探测微弱信号的空间传感器时,像面上的杂光水平的分析具有极其重要的意义.大型杂光分析计算机软件虽有较强功能,适用于多种复杂光学系统,但是它们需要在大型快速计算机上运行,而一些已发表的简化模型的计算方法,虽然容易运行,却又失之于过分粗糙.本文考虑微机已获普及的这一现状,提出了分块计算的介于两者之间的折衷模型,对于很大的一类光学系统,既能获得接近大型软件的分析结果,又能在微机上方便地运行.实例计算表明,这是一种切实可行的方法,具有实用价值.

参 考 文 献

- [1] S. Kendrick, R. Kovacs, Solar simulation for testing off-axis light attenuation of a star sensor assembly. *Proc. SPIE*, 1977, **107**:150~157
- [2] R. P. Breault, Current technology of stray light. *Proc. SPIE*, 1986, **675**:4~13
- [3] R. P. Breault, A. W. Greynolds, S. T. Lange, APART/PADE 7; a deterministic computer program used to calculate scattered and diffracted energy. *Proc. SPIE*, 1980, **257**:50~63
- [4] S. S. Steadman, B. K. Likeness, GUERAP III simulation of stray light phenomena. *Proc. SPIE*, 1977, **107**:98~106
- [5] A. W. Greynolds, Formulas for estimating stray-radiation levels in well-baffled optical system. *Proc. SPIE*, 1980, **257**:39~49
- [6] J. A. Bamberg, Stray light analysis with the HP-41 C/CV calculator. *Proc. SPIE*, 1983, **384**:109~116
- [7] 车念曾, 闫达远, 辐射度学和光度学. 北京:北京理工大学出版社, 1990:426
- [8] R. 西格尔, J. R. 豪厄尔, 热辐射传热. 北京:科学出版社, 1990:130
- [9] J. E. Harvey, Light-scattering characteristics of optical surfaces. *Proc. SPIE*, 1977, **107**:41~47

Stray light analysis with PC computer*

LI Dexiong YAN Dayuan

(Optical Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 29 July 1992; revised 19 October 1992)

Abstract

A Stray radiation analysis program suitable for use on PC computer is described. The program is ideally suited for quick estimates of stray light performance in well-baffled optical systems, to calculate the single scatter of main mirror, double scatter of baffle-mirror, and diffraction-scatter of baffle edge in a similar form of some large program of stray radiation analysis. The prediction made by the program for a typical system is comparable with the result of the APART large analysis program.

Key words stray light analysis, stray radiation, radiation scatter.

* The project supported by Doctoral Programme Foundation of Institution of Higher Education(China)