

## 光学元件质量对红外光学系统信噪比的影响

游兴海, 张 彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 基于米氏散射理论, 建立了光学元件基板不同疵病等级光学元件的散射模型, 进而定量分析了元件表面存在粒子污染时的基板缺陷复制引起的表面散射特性。在此基础上, 以 R-C 光学系统为例, 利用 ASAP(Advanced System Analysis Program) 光学分析软件, 针对主镜表面存在粒子污染的情况, 仿真计算和分析系统主镜基板不同疵病等级的杂散辐射特性, 并根据信噪比的计算方法, 对系统信噪比进行了计算和分析。结果表明: 当天空背景辐射温度不变时, 随着主镜基板疵病等级的增加, 系统信噪比明显减小。当主镜基板疵病等级不变时, 随着天空背景辐射温度的升高, 主镜基板不同疵病等级对信噪比的影响逐渐减小。当天空背景温度为 200 K 时, 对于主镜表面粒子污染为 300 等级(粒子表面覆盖率为 0.03%), 且其基板疵病等级分别为 I-10、I-20、I-30、II 和 III 五种情况, 计算得到系统相对信噪比(相对于理想主镜)分别为 0.932、0.920、0.906、0.832 和 0.807。由此可见, 当元件光学特性变差时, 为保证微弱信号的有效探测, 必须将疵病等级严格控制在 II 级以内。

**关键词:** 信噪比; 粒子污染; 缺陷; 散射模型

**中图分类号:** O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0320004

## Influence of optical component quality on signal to noise ratio in infrared optical systems

You Xinghai, Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A scattering model of the optical component substrate under different levels of defects has been established based on Mie scattering theory, and then the scattering characteristics of the replication of substrate defect have been analyzed quantitatively when the particle contamination exists on the surface of the optical component. On this basis, a R-C optical system has been taken as an example, and stray radiation characteristics of the system have been simulated and analyzed by using the ASAP optical analysis software for the case of the primary mirror substrate under different levels of defects. Furthermore, according to the calculation method of the signal to noise ratio (SNR), the SNR of the system has also been carried out and analyzed. The results indicate that the SNR of the system decreases with the increasing of the defect levels of primary mirror substrate for a given radiant temperature of the

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队项目(2014RA4051)

作者简介: 游兴海(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外光学系统设计与优化方面的研究。Email: youxinghai\_scu@163.com

导师简介: 张彬(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光通信、光电子技术等方面的研究。Email: zhangbinff@sohu.com

sky background, and the influence of the SNR decreases with the increasing of the radiant temperature of the sky background for a fixed defect level of primary mirror substrate. Finally, for the primary mirror particle contamination of 300 grades (the particle surface coverage is 0.03%) and its substrate defect levels under five cases such as I-10, I-20, I-30, II and III, the relative SNR (relative to the ideal primary mirror) of the system are 0.932, 0.920, 0.906, 0.832 and 0.807, respectively when the radiant temperature of the sky background is 200 K. Thus, when the optical properties of components become worse, the levels of optical component defects should be strictly controlled within II level to ensure the effective detection of the weak signal with low SNR.

**Key words:** signal to noise ratio; particle contamination; defect; scattering model

## 0 引言

随着现代科学技术的发展,对光学系统提出了更严格的要求,而光学元件加工工艺及运行环境的限制导致其必然存在着杂质、划痕、麻点等“缺陷”及表面污染。光学系统最常见的杂散光是在视场以外以倾斜角度进入光学系统,进而由机械件散射到视场中而进入后续光路的,而这种散射通常容易被消除。然而,要想消除先入射到透镜或反射镜上,而后又经光学元件的表面散射到视场中而进入光学系统的视场外光线却要困难得多。这种散射通常由下列两方面因素造成的:(1)与光的波长相比,大于光的波长的表面划痕、麻点或其它缺陷产生的散射;(2)由于高质量光学表面几乎都是无缺陷的,因此,散射来源于因抛光或其它工艺造成表面微小不规则性缺陷。

通常情况下,由于现代加工技术的限制,光学元件在基板加工过程中不可避免地会留下各类缺陷。并且,在光学元件的使用过程中,其表面还会产生污染。这些缺陷及表面污染会对入射光造成不同程度的散射,这不仅增加光能量的损耗,而且也会引起红外光学系统成像质量的劣化,进而影响红外光学系统对目标信号的提取与分析<sup>[1]</sup>,因此,有必要研究光学元件缺陷及表面污染对系统杂散辐射性能的影响。

早期的红外光学系统杂散辐射分析主要依靠手工经验估算,而随着计算机技术的发展,杂散辐射分析软件大量涌现,包括 ASAP、Zemax 和 TracePro 等。国外对光学系统元件表面污染的研究较早且文献多集中在 1980~2000 年之间<sup>[2-7]</sup>。1996 年,美国航空航天局(NASA)太空飞行中心的 A.C. Terrible 等<sup>[5]</sup>讨论了元件表面污染对航天器件的影响,以及对污染的控

制。1999 年,NGST (Next Generation Space Telescope) 空间望远镜研究所的 Pierre Y. Bely, Matt Lallo 和哥达德太空飞行中心的 Keith Parrish 等<sup>[9]</sup>基于 Yardstick 项目开展了系统杂散辐射分析,并讨论了元件表面污染物对系统杂散辐射性能的影响。国内对于光学元件表面污染的研究起步较晚,相关工作并不多,但随着对污染问题的逐步重视,也取得一定的研究进展<sup>[8-10]</sup>。2012 年,肖静等<sup>[9]</sup>开展了光学元件表面污染对系统信噪比的影响分析,认为当光学元件表面污染微粒的覆盖率达到一定程度时,会影响光学系统对微弱信号的探测。2015 年,吴建鹏等<sup>[10]</sup>基于光学元件表面的非均匀团簇污染模型,研究了红外光学系统团簇污染对系统杂散辐射特性的影响。

在给定主镜表面粒子污染等级为 300 的情况下,基于米氏散射理论,定量分析了主镜基板不同疵病等级复制的散射特性,进而建立了主镜散射模型。在此基础上,以 R-C 光学系统为例,结合 ASAP 光学分析软件,对主镜表面中度污染及其基板在不同疵病等级情况下系统的杂散辐射特性进行了仿真分析,并计算得到相应的信噪比。

## 1 基础模型

### 1.1 米氏散射模型

根据光与物质的相互作用原理,当一束光入射到媒质中时,会产生透射、折射、散射等一系列物理现象。针对散射,又可分为弹性散射与非弹性散射。对于弹性散射,主要包括瑞利散射、米氏散射和无选择性散射三类,其特性与入射光波波长,水体中悬浮颗粒物尺寸、密度和形状等参数密切相关<sup>[11]</sup>。通常而言,当媒质中颗粒尺寸远小于入射光波波长时,可采

用瑞利散射表征散射光强与光波波长之间的关系,而当颗粒尺寸与光波波长相当时,则可利用米氏散射进行表征<sup>[12]</sup>。

早在 1908 年, Gustav Mie 在解释悬浮于水中的微小金胶体粒子(金溶胶颗粒)对光的散射与吸收呈现出的各种颜色时提出了光散射理论,后来称之为米氏散射理论<sup>[13]</sup>。

根据米氏散射理论,可以得到任意球形颗粒的散射光强分布与颗粒的粒径及分布有密切关系。对于某一颗粒系统有多种粒度分布颗粒的情况,由米氏散射理论可知,当一束波长为  $\lambda$ 、光强为  $I_0$  的平面波照射到单个球形颗粒时,其散射光在光电探测器某一环上散射的光能量为<sup>[13]</sup>:

$$E = \frac{3\lambda^2 I_0}{\pi^2 \rho} \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{d_j^3} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (i_1 + i_2) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为散射角;  $W_j$  表示直径为  $d_j$  的颗粒的质量;  $\rho$  为其密度;  $i_1$  和  $i_2$  为散射强度函数,可分别表示为:

$$i_1(\alpha, m, \theta) = |S_1|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2 \quad (2)$$

$$i_2(\alpha, m, \theta) = |S_2|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2 \quad (3)$$

式中:  $a_n$  和  $b_n$  为米氏系数,是颗粒相对周围介质的折射率  $m$  及表征粒径大小的无因次参量  $\alpha = (\pi d / \lambda)$  的函数,可以用半整数阶贝塞尔函数和第二类汉克尔函数表示;  $\pi_n$  和  $\tau_n$  为散射角函数,可以用  $\cos \theta$  的勒让德和一阶缔合勒让德函数表示<sup>[14]</sup>。需要指出的是,  $n$  的取值不能太小,否则计算会产生较大的误差;同样,  $n$  的值不宜太大,否则收敛较慢,计算时间较长。文中参照 Wiscombe 给出的检验公式来确定  $n$  的有效值<sup>[15]</sup>。

对于球形颗粒缺陷而言,由米氏散射理论可以得到其散射场光强的角分布量,进而可以计算不同粒径颗粒的散射量。在此基础上,选择适当的统计模型,可以计算得到光学元件缺陷的总散射。

### 1.2 信噪比模型

由于系统中光学元件缺陷和表面污染的存在,红外光学系统在进行微弱信号探测时,不仅会增加系统中元件自身热辐射,还会降低视场内目标信号的强度、增加视场外物体的信号强度,从而降低系统

信噪比。红外光学系统在进行探测时,探测器的噪声可分为三类<sup>[15]</sup>: (1) 探测器固有噪声,如复合噪声、 $1/f$  噪声、热噪声和散粒噪声; (2) 光子噪声,是由信号和背景辐射产生的光生电子起伏引起的噪声,与光生电子数的  $1/2$  次方成正比; (3) 由具有一定频率带宽的下联放大器产生的噪声,如量化噪声。

信噪比的计算主要有比探测率法和等效电子法<sup>[9]</sup>。等效电子法是将信号和噪声以电子数的方式表示,它是将探测器单元接收的辐射功率转换成光子数,再由探测器的量子效率得到电子数。由信号所引起的等效电子数可表示为<sup>[9]</sup>:

$$N_s = \frac{P_s \cdot \eta \cdot \Delta \tau}{E} \quad (4)$$

式中:  $P_s$  为目标信号强度;  $\eta$  为探测器的量子效率;  $\Delta \tau$  为探测器的积分时间;  $E = hc / \lambda$  为探测器的禁带宽度,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为探测波长。

同理,由背景辐射功率所引起的光电子数可表示为:

$$N_b = \frac{P_b \cdot \eta \cdot \Delta \tau}{E} \quad (5)$$

式中:  $P_b$  代表背景辐射功率。

在红外光学系统中,为有效抑制系统自身热辐射,通常会将探测器进行低温冷却处理。因此,探测器自身固有噪声要远小于背景辐射噪声。当目标信号辐射功率远小于背景辐射功率时,红外光学系统的信噪比可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\text{SNR} = \sqrt{\frac{\Delta \tau \cdot \eta}{E} \cdot \frac{P_s}{\sqrt{P_b}}} \quad (6)$$

公式(6)表明,系统信噪比与信号目标辐射功率成正比,而与背景辐射的平方根成反比。通常,红外光学系统探测器在进行微弱信号探测时,一般会受到背景辐射噪声的限制。

## 2 系统仿真模型的建立与信噪比分析

为研究光学元件质量对红外光学系统信噪比的影响,需要运用 ASAP 软件建立系统的三维光机仿真模型,并为系统各元件指定合理的散射模型。

### 2.1 光机模型的建立

为研究主镜表面粒子污染及其基板缺陷复制作用对红外光学系统信噪比的影响,以 R-C 光学系统为例,其结构如图 1 所示<sup>[16]</sup>,并使用 ASAP 光学分析

软件建立三维仿真模型。系统全视场角为  $1.6^\circ$ ，入瞳直径为 1 200 mm，工作波段  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ，系统温度为 275 K。系统设有 100%匹配的冷阑，以抑制视场外元件的热辐射。

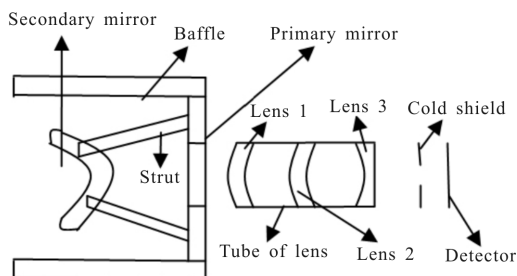


图1 红外成像光学系统结构设计示意图

Fig.1 Design schematic of the infrared imaging optical system

### 2.2 散射模型的建立

在建立了红外光学系统的仿真模型后，对其进行杂散辐射分析的前提是需要为系统各光学件和机械件指定合适的散射模型来表征其表面的散射特性。计算时，假定反射镜的反射率为 0.98，并采用修正哈维模型对其散射特性进行描述<sup>[9]</sup>，其全积分散射 TIS 为 0.018%。透镜的透过率为 0.99，全积分散射为 0.4%。系统机械件的反射率为 2%，并采用 TIS 为 2%的朗伯模型对其散射特性进行描述，其表面涂黑处理，吸收率为 0.96。

在光学元件表面洁净度分别为 300、500、750（微粒表面覆盖率为 0.03%、0.3%、2.7%）的情况下，对应于轻度污染、中度污染和重度污染三种镜面污染的情况，图 2 分别给出了其双向散射分布函数 (BSDF) 随散射角归一化分布图(图 2(a)反射镜表面污染 300 等级，图 2(b)反射镜表面污染 500 等级，图 2(c)反射镜表面污染 750 等级)。在大型望远镜系统

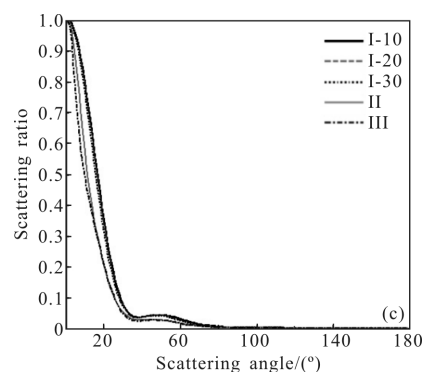
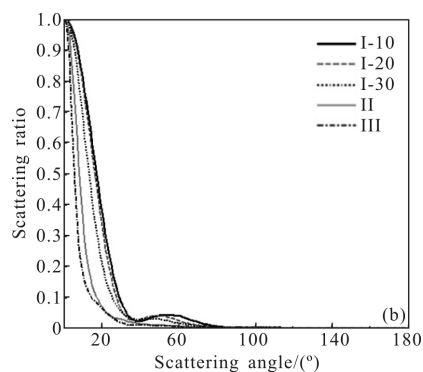


图 2 BSDF 随散射角的归一化分布

Fig.2 BSDF along with the normalized distribution of the scattering angle

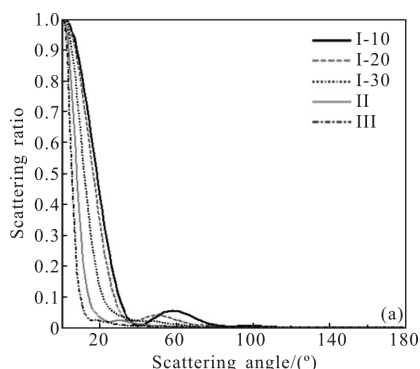
中，通常主镜的尺寸较大，且加工较为困难，因而文中重点针对主镜质量进行研究。以主镜表面污染为 300 等级的情况为例，主镜基板不同疵病等级的散射特性用两个修正哈维模型之和来拟合米氏散射模型计算的 BSDF 数据。

主镜的总散射为由表面粗糙度、表面粒子污染和基板缺陷复制三者之和。针对元件表面粒子污染，采用 MIL-STD-1246C 标准来进行微粒分布的近似描述，污染粒子的密度和尺寸服从对数正态分布，即：

$$\log N(x) = C[\log^2 X_1 - \log^2 x] \quad (7)$$

式中： $x$  为污染粒子的尺寸； $N(x)$  为每平方英尺上大于或者等于  $x$  的粒子数目； $X_1$  表示光学元件表面洁净度等级； $C$  是归一化常数，在该标准中  $C$  值为 0.926。公式(7)表明，小尺寸粒子出现的概率较高，而大尺寸粒子出现的概率较低。因此，在计算中可以近似认为光学元件表面的污染粒子为小尺寸粒子。

针对基板缺陷，已有的大量实验和理论研究表明，光学元件缺陷的尺寸与其密度服从幂指分布，即



缺陷尺寸越小密度越大<sup>[17-18]</sup>:

$$P(r)=A \cdot r^{-m} \quad (8)$$

式中: $P$  表示缺陷尺寸为  $r$  时的密度; $A$  和  $m$  是两个与光学元件相关的参数。根据国标(GB1185-79)中基板表面缺陷的检测标准<sup>[19]</sup>,元件疵病等级由低到高可以划分为 I-10、I-20、I-30、II 和 III 等 10 个等级,疵病等级越高,表明元件加工质量越差。针对基板缺陷复制,缺陷具有抛物线边界的柱对称结构,其表面直径与种子的大小和深度满足如下关系<sup>[20]</sup>:

$$h=d, D=(8dT)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: $D$  为薄膜表面缺陷的直径; $d$  为基板缺陷种子的直径; $T$  为种子的深度。计算时假定主镜基板材料为 Si,其折射率为  $3.44-2.4 \times 10^{-8}i$ ,在 Si 基板上镀单层厚度为 100 nm 的 Ag 薄膜,保护膜为 ZnS/YbF<sub>3</sub>。计算波长为 4 μm。

由图 2 可知,主镜表面污染及其基板缺陷复制作用引起的散射能量主要集中在前向(散射角位于 0°~90°),且在主镜表面污染等级给定的情况下,其基板疵病等级越高,前向集中越明显,对基板缺陷的复制作用影响更为明显。进一步对比图 2(a)~(c)可知,即使基板加工质量较好,如果光学元件表面污染越严重,则其引起的散射量越大。反之,即使光学元

件表面轻度污染,如果基板加工质量越差,则其散射量也越大。

### 2.3 信噪比分析

由于信噪比与探测器接收的信号辐射及背景辐射有关,因此需要对红外光学系统杂散辐射特性进行分析。探测器接收到的背景辐射包括系统内部元件自身热辐射和外界辐射源的杂散辐射。其中,外界杂散辐射源主要包括太阳和天空背景。

#### 2.3.1 系统内部元件自身热辐射

在主镜表面污染为 300 等级的情况下,以图 1 所示的 R-C 望远镜为例,对主镜基板疵病等级分别为 I-10、I-20、I-30、II 和 III 以及主镜洁净(即基板无缺陷和主镜表面无污染)六种情况进行初步分析发现,系统中机械件的杂散辐射通量之和大于光学元件的杂散辐射通量之和,因而对系统做了如下优化:(1)对系统遮光罩添加了挡光环;(2)对不是关键面的机械件,涂黑处理;(3)对透镜镜筒等是关键面但不是被照射面,打毛处理;(4)对支撑筋等既是关键面又是被照射面,先涂黑处理再打毛处理。表 1 给出了红外光学系统各元件到达探测器像面上的杂散辐射通量。

从表 1 可以看出:在给定主镜表面污染为 300 等级情况下,随着主镜基板疵病等级的增加,主镜的杂

表 1 主镜不同疵病等级时系统元件到达探测器的杂散辐射通量(单位:W)

Tab.1 Stray radiation flux of the system components arriving at the detector under the primary mirror of different defect levels (Unit:W)

	Clean	Defect level I-10	Defect level I-20	Defect level I-30	Defect level II	Defect level III
Primary mirror	$8.23 \times 10^{-6}$	$4.01 \times 10^{-5}$	$4.52 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-5}$	$7.04 \times 10^{-5}$	$8.28 \times 10^{-5}$
Secondary mirror	$9.16 \times 10^{-6}$	$9.48 \times 10^{-6}$	$9.52 \times 10^{-6}$	$9.58 \times 10^{-6}$	$9.65 \times 10^{-6}$	$9.70 \times 10^{-6}$
Lens 1	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-6}$
Lens 2	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.83 \times 10^{-6}$
Lens 3	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$
Strut	$8.06 \times 10^{-6}$	$2.86 \times 10^{-5}$	$3.01 \times 10^{-5}$	$3.35 \times 10^{-5}$	$7.26 \times 10^{-5}$	$8.56 \times 10^{-5}$
Baffle	$7.10 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-5}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	$5.21 \times 10^{-5}$	$6.19 \times 10^{-5}$
Tube of lens	$3.78 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$
Total	$4.91 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-4}$	$2.57 \times 10^{-4}$

散辐射通量将随着其自身发射率的增大而增大。次镜的杂散辐射通量基本没有变化,主要原因是次镜正对着探测器,其自身杂散辐射能直接到达探测器,因而受主镜基板疵病的影响较小。三个透镜和透

镜筒的杂散辐射通量几乎没有变化,主要是由于这些元件位于系统后组,其自身杂散辐射不需要经过主次镜的反射及散射。支撑筋和遮光罩的杂散辐射通量将随着主镜表面散射量的增加而增大,主要原

因是机械件的杂散辐射主要是通过主次镜的散射进入后续光路,最终到达探测器像面。

2.3.2 外界辐射源杂散辐射特性分析

太阳辐射一般不能直接到达系统像面,其杂散辐射只能通过系统内部元件的散射而到达探测器,由于光学系统一般不会正对着目标探测,故假定太阳入射光线与系统光轴的夹角分别为 10°、20°和 30°,并将太阳视为温度为 5 900 K 的黑体。天空背景则主要是通过主、次镜的反射而直接到达探测器焦

平面,在对天空背景进行杂散辐射特性分析时,将天空背景等效成 200~280 K 的黑体,在主镜表面污染为 300 等级时主镜基板不同疵病等级和主镜理想时,探测器接收的太阳和天空背景的杂散辐射通量由表 2 给出波长为 3~5 μm。

从表 2 可以看出,探测器接收的太阳杂散辐射通量小于天空背景的杂散辐射通量。此外,在主镜表面污染为 300 等级的情况下,当太阳与系统光轴入射角度一定时,随着主镜基板疵病等级的增加,探测

表 2 探测器接收的外界辐射源的杂散辐射通量(单位:W)

Tab.2 Stray radiation flux from the out-side sources on the detector (Unit:W)

Stray radiation source	Clean	Defect level I-10	Defect level I-20	Defect level I-30	Defect level II	Defect level III	
Sun/(°)	10	5.36×10 <sup>-8</sup>	4.96 ×10 <sup>-7</sup>	5.39×10 <sup>-6</sup>	5.72 ×10 <sup>-6</sup>	6.89×10 <sup>-6</sup>	8.01×10 <sup>-6</sup>
	20	4.12×10 <sup>-8</sup>	4.36×10 <sup>-7</sup>	4.63×10 <sup>-7</sup>	5.16×10 <sup>-7</sup>	7.11×10 <sup>-7</sup>	9.01×10 <sup>-7</sup>
	30	2.93×10 <sup>-8</sup>	1.85×10 <sup>-7</sup>	2.26×10 <sup>-7</sup>	2.83×10 <sup>-7</sup>	4.01×10 <sup>-7</sup>	5.86×10 <sup>-7</sup>
Sky/K	200	3.33×10 <sup>-4</sup>	3.32×10 <sup>-4</sup>	3.32×10 <sup>-4</sup>	3.32×10 <sup>-4</sup>	3.32×10 <sup>-4</sup>	3.31×10 <sup>-4</sup>
	220	4.51×10 <sup>-4</sup>	4.50×10 <sup>-4</sup>	4.50×10 <sup>-4</sup>	4.49×10 <sup>-4</sup>	4.49×10 <sup>-4</sup>	4.49×10 <sup>-4</sup>
	240	5.63×10 <sup>-4</sup>	5.62×10 <sup>-4</sup>	5.62×10 <sup>-4</sup>	5.62×10 <sup>-4</sup>	5.61×10 <sup>-4</sup>	5.61×10 <sup>-4</sup>
	260	6.72×10 <sup>-4</sup>	6.71×10 <sup>-4</sup>	6.71×10 <sup>-4</sup>	6.70×10 <sup>-4</sup>	6.70×10 <sup>-4</sup>	6.69×10 <sup>-4</sup>
	280	7.75×10 <sup>-4</sup>	7.74×10 <sup>-4</sup>	7.73×10 <sup>-4</sup>	7.73×10 <sup>-4</sup>	7.73×10 <sup>-4</sup>	7.72×10 <sup>-4</sup>

器所接收的太阳杂散辐射通量明显增大,主要原因是基板疵病等级越高,元件表面的散射量越大,最终由镜面散射而到达探测器的太阳辐射能也越大。当主镜基板疵病等级一定时,随着太阳与系统光轴入射角度的增大,探测器所接收的太阳杂散辐射通量逐渐减小。而当天空背景温度不变时,主镜基板不同疵病等级的杂散辐射通量则将随着系统透过率的降低而逐渐减小,但变化不大。当天空背景的有效辐射温度在 200~280 K 内变化时,探测器接收的天空背景杂散辐射通量将随着其辐射温度的升高而逐渐增大。

2.3.3 信噪比分析

由表 1 和表 2 可知,探测器接收的太阳辐射要小于天空背景及系统内部元件热辐射,因而在分析主镜表面污染及其基板不同疵病等级对信噪比的影响时,仅对太阳入射光线与系统光轴夹角为 30°时的情况进行讨论。公式(6)表明,系统的信噪比与探测

器接收的信号辐射及背景辐射有关。探测器接收到的背景辐射是系统内部元件自身热辐射、太阳和天空背景杂散辐射三者之和。由于光学元件的污染及缺陷引起的信噪比相对变化量只与信号和背景辐射的相对大小有关系,而与光学元件干净时的初始信噪比关系并不大。为了方便而直观地分析镜面污染对信噪比的相对影响,将不同的天空背景辐射温度且反射镜表面洁净时的信噪比设为 1,从而得到目标信号强度,用于后续计算。计算信噪比所用参数为<sup>[9]</sup>: Δτ=1×10<sup>-6</sup> s, η=0.5, E=1.7×10<sup>-20</sup> J。表 3 给出了天空背景不同辐射温度及主镜基板不同疵病等级缺陷复制时的信噪比相对值。

分析表 3 可知,在给定主镜表面污染为 300 等级的情况下,随着主镜基板疵病等级的增加,信噪比明显减小。此外,当主镜基板疵病等级不变时,随着天空背景辐射温度的升高,主镜表面污染及其基板

表 3 天空背景不同辐射温度时的信噪比相对值

Tab.3 Relative SNR under different radiation temperatures of the sky background

$T_{sky}/K$	Clean	Defect level I-10	Defect level I-20	Defect level I-30	Defect level II	Defect level III
200	1	0.932	0.920	0.906	0.832	0.807
220	1	0.947	0.938	0.926	0.863	0.841
240	1	0.956	0.947	0.938	0.886	0.864
260	1	0.962	0.955	0.949	0.892	0.883
280	1	0.967	0.960	0.955	0.910	0.891

不同疵病等级对信噪比的影响逐渐减小。

### 2.3.4 系统光学元件容限讨论

红外光学系统的运行过程中,当光学元件表面的污染和基板疵病等级在某一范围内时,可认为系统探测性能基本不变,而当镜面污染和基板疵病等级超过该限度时,系统探测性能迅速降低,该容许的污染和疵病程度范围即为该系统的污染容限。对于红外光学系统,可将光学元件污染容限定义为:污染前后信噪比的相对变化量需要控制在 10% 左右,以保证低信噪比时对微弱信号的有效探测<sup>[9]</sup>。

为保证系统探测性能,即污染和疵病引起的信噪比变化不能大于 10%,根据 2.3.3 节的仿真计算可知:在给定主镜表面污染为 300 等级的情况下,当基板疵病为 II 级,且天空背景温度小于 280 K 时的信噪比相对减小量已超过 10%。此时,在给定主镜表面污染为 300 等级的情况下,为了保证系统的探测性能,光学元件上疵病等级需要严格控制在 II 级以内。此外,在实际应用中,还需要进一步通过污染监测与控制来减小光学元件粒子污染对系统信噪比的影响。首先,对于不同污染容限的光学元件采用不同的污染检测方式。对于污染容许程度较大的元件表面,一旦观测到元件变脏,清洗和维护即可。而对于一些洁净度要求更严格的表面,可在其附近放置一块类似的监测样板,通过监测样板,实现对元件表面的在线监测。当发现洁净度低于可接受的范围,须同时清洁监测样板和污染元件<sup>[21]</sup>。其次,观测时应选择良好的环境条件,且尽可能减小元件表面暴露的时间。在系统运行期间,应避免粒子污染和油污等分子污染源,且工作人员在进入污染控制区域前后要遵守相关污染控制准则<sup>[23]</sup>。

为了从源头上减小甚至根除元件表面污染,需从以下几个方面进行预防。首先,在系统设计时,应尽可能地让污染敏感元件远离污染源,让污染源不能直接“看到”关键的表面<sup>[22]</sup>。其次,在元件材料选取时,应对拟选取材料的特性和处理工艺事先验证。此外,系统组装过程必须全程对元件表面洁净度进行控制,且尽可能减小元件表面暴露的时间<sup>[23]</sup>。最后,在输运过程中和非运行期间还应采取遮盖措施。此外,一旦发现元件表面污染程度超过容限,需要采取措施对元件表面进行清洁处理,例如,利用喷涂流体等非接触式清洁方法,可将清洁后的元件表面洁净度控制在 250 等级以内(元件上污染粒子的表面覆盖率约为 0.01%)<sup>[22,24]</sup>。

## 3 结 论

在米散射理论的基础上,利用粒子污染的模型和基板缺陷分布的统计模型,分析了在主镜表面污染为 300 等级的情况下,基板不同疵病等级光学元件的散射特性,并建立散射模型。最后,以 R-C 望远镜系统为例,计算了对信噪比的影响。

在给定元件表面污染为 300 等级的情况下,研究表明:(1) 随着主镜基板疵病等级的增加,其散射量逐渐增大,且主镜基板疵病等级越高,前向集中越明显,因而主镜基板疵病等级越高,其复制作用影响更为明显;(2) 对 R-C 望远镜系统自身热辐射分析可知,对于视场内元件主镜、次镜和支撑筋,其杂散辐射通量变化不大,而对于视场外元件主镜环、次镜环和桁架,其杂散辐射则将随着主镜表面散射量的增加而迅速增大;(3) 对太阳外部杂散辐射特性分析可知,随着主镜基板疵病等级的增加,探测器所接收

的太阳杂散辐射通量明显增大。(4) 对天空背景外部杂散辐射特性分析可知,当天空背景温度不变时,随着主镜基板疵病等级的增加,其杂散辐射通量略为减小。当天空背景的有效辐射温度在 200~280 K 内变化时,探测器接收的天空背景杂散辐射通量将随着其辐射温度的升高而逐渐增大;(5) 对系统信噪比分析可知,当天空背景的辐射温度不变时,随着主镜基板疵病等级的增加,信噪比逐渐减小。此外,当主镜基板疵病等级不变时,随着天空背景辐射温度的升高,主镜基板不同疵病等级对信噪比的影响逐渐减小;(6) 对系统光学元件容限分析可知,光学元件上疵病等级需要严格控制在 II 级以内。因此,在实际应用中,必须严格控制光学元件表面污染等级及其基板表面疵病等级,以保证红外光学系统性能满足需求。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(11): 3353-3357. (in Chinese)  
江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消色差设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3353-3357.
- [2] Facey T A, Nonnenmacher A L. Measurement of total hemispherical emissivity contaminated mirror surfaces [C]// SPIE, 1989, 967: 308-313.
- [3] Spyak P R, Wolfe W L. Scatter from particulate contaminated mirrors. Part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and  $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$  [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1746-1756.
- [4] MIL -STD -1246C. (15FEB2002) [S]. Military Standard: Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program, 2002.
- [5] Li Fangqing, Zhang Bin, Xiao Jing, et al. Stray light analysis of the contaminated mirror of the infrared optical system[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2010, 8(4): 22-25. (in Chinese)  
李方清, 张彬, 肖静, 等. 红外光学系统的污染镜面杂散辐射分析[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(4): 22-25.
- [6] Pierre Y Bely, Matt Lallo, Larry Petro. Stray light analysis of the yardstick mission [DB/OL]. [1999-07-23].http://www.ngst.stsci.edu/nms/main/repo.
- [7] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community [R]. Alabama, Marshall Space Flight Center: NASA Contractor Report, 1996: 4740.
- [8] He P, Xiao J, Zhang B, et al. The influence of contaminated mirror on the flux distributions of stray radiation of infrared telescope systems [C]//SPIE, 2010, 7654: 76540T.
- [9] Xiao Jing, Zhang Bin. Influence of the optical components contamination on the signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1010-1016. (in Chinese)  
肖静, 张彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1010-1016.
- [10] Wu Jianpeng, Luo Wenfei, Peng Jiaqi, et al. Influence of particle cluster contamination on the stray light radiation of infrared optical systems [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 8(4): 22-25. (in Chinese)  
吴建鹏, 罗文飞, 彭家琪, 等. 红外光学系统团簇污染对系统杂散辐射特性的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 8(4): 22-25.
- [11] Dave J V. Scattering of visible light by large water spheres [J]. *Applied Optics*, 1969, 8(1): 155-164.
- [12] Zhang Wei, Lu Yuan, Du Shiming, et al. Analysis of characteristics of Mie scattering[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(6): 936-939. (in Chinese)  
张伟, 路远, 杜石明, 等. 球形粒子 Mie 散射特性分析[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 936-939.
- [13] Wang Xueyan. Research on particle size test algorithm based on Mie theory [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2011. (in Chinese)  
王雪艳. 基于米氏散射理论的粒度测试算法研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2011.
- [14] Craig F Bohren, Donald R Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. US: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 234-288.
- [15] Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. The use of Power Spectral Density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]//SPIE, 1995, 2576: 281-292.
- [16] Yan Peipei, Fan Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 214-218. (in Chinese)  
闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光 [J]. 红外技术, 2011, 33(4): 214-218.
- [17] Zhou Lidian. Research on statistical law between optical component "defects" distribution and near-field quality in high power laser system [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009. (in Chinese)  
周丽丹. 高功率激光装置光学元件“缺陷”分布与光束近场



- 质量统计规律研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
- [18] You Xinghai, Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, et al. Effect of defects of component on stray radiation characteristics of infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0120004. (in Chinese)
- 游兴海, 胡小川, 彭家琪, 等. 元件缺陷对红外光学系统杂散辐射特性的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0120004.
- [19] Xu Deyan, Wang Qing, Gao Zhishan, et al. Current Optical Components Detection and International Standards [M]. Beijing: Science Press, 2009: 264–267. (in Chinese)
- 徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 264–267.
- [20] Shan Yongguang, Liu Xiaofeng, He Hongbo, et al. Research progress of nodular defect in optical coatings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1421–1429. (in Chinese)
- 单永光, 刘晓凤, 贺洪波, 等. 光学薄膜中节瘤缺陷研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1421–1429.
- [21] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community NASA Contractor Report [R]. Alabama: Marshall Space Flight Center, 1996: 4740.
- [22] Chen P T, Hedgeland R J, Thomson S R. Surface accommodation of molecular contaminants[C]//Optical System Contamination: Effects, Measurement, Control II. International Society for Optics and Photonics, 1990: 327–336.
- [23] Vest C E, Buch R M, Lenkevich M J. Materials selection as related to contamination of spacecraft surfaces [J]. *Sampe Quarterly*, 1988, 19(2): 29–35.
- [24] Lei Min, Li Xiaoping, Miao Huaikun. Development of contamination control techniques for EUV optics surfaces [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030005. (in Chinese)
- 雷敏, 李小平, 苗怀坤. 极紫外光学表面污染控制技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030005.