

# 用叠加积分法计算任意形状冷屏的光度无效性

杨开宇 金 宁 徐 曼 曹 凌 苏君红

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要** 在红外系统中,冷屏的开孔形状直接影响着它对杂散光的抑制效能。利用光度无效性来评价冷屏形状抑制红外系统杂光的能力,提出了利用叠加积分精确计算任意形状冷屏的光度无效性的新思路 and 算法,建立了数学模型,通过对一个典型  $288 \times 4$  热像系统的实例计算,与光线统计法的运算结果进行比较,结果相一致,且与光线统计法精度相同的情况下,具有运算速度快的优势。

**关键词** 光计算;红外光学;光度无效性;叠加积分法;冷屏;立体角

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0311004

## Calculation of Photometric Inefficiency for All Shapes of Cold Shields with Superposition Integral Method

Yang Kaiyu Jin Ning Xu Man Cao Ling Su Junhong

(Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

**Abstract** The aperture shapes of cold shields have direct effects on stray light suppressing in infrared systems. The concept of photometric inefficiency is introduced to evaluate the cold shield shapes' ability of suppressing stray light. A creative idea and algorithm of using the superposition integral method to accurately calculate the photometric inefficiency for all shapes of cold shields are proposed. Based on the method, a mathematical model is built. A typical  $288 \times 4$  thermal imager is chosen as an instance to be calculated by the program. Compared with the results calculated by the ray tracing statistical method, it is concluded that superposition integral method has accordant results to the ray tracing statistical method, which has far higher speed of computation than ray tracing statistical method when they get the same accuracy.

**Key words** optics in computing; infrared optics; photometric inefficiency; superposition integral method; cold shield; solid angle

**OCIS codes** 110.3080; 110.6820; 080.1753; 080.2720

## 1 引 言

红外系统中的冷屏是用于阻止背景杂散热辐射进入探测器的一种元件,它一方面确定了光学系统的通光口径,保证探测器能够获得足够的信号能量;另一方面,屏蔽了系统内部件产生的杂散热辐射,这些辐射温度远高于制冷温度<sup>[1,2]</sup>,若到达探测器则会形成非均匀的背景噪声<sup>[3]</sup>。在冷屏效率低于 100% 的情况下,冷屏的开孔形状对系统的性能至关重要,它直接影响着像面接收目标能量的多少、杂散辐射能量的多少以及辐射能随探测器单元位置分布

的均匀性,此时需根据系统的具体情况对冷屏的开孔形状进行优化设计。而在冷屏的优化过程中,需要定量计算冷屏在系统中的作用效能参数。本文采用文献[4]中引入的光度无效性这一概念作为该参数,用于衡量不同形状的冷屏在系统中优劣性。

冷屏的光度无效性没有解析的表达式,但可根据光学系统的结构参数,通过选择合适的算法编写程序做具体的数值计算,难度比较大。在近年来国内外文献的报道中,涉及到一些对冷屏所限制的立体角大小和冷屏效率进行计算的方法,包括计算圆

**收稿日期**: 2012-09-25; **收到修改稿日期**: 2012-11-19

**作者简介**: 杨开宇(1984—),女,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yky20030634@126.com

**导师简介**: 金 宁(1967—),男,博士,研究员,主要从事红外光学技术方面的研究。E-mail: jinningkip@126.com

形、矩形、运动场形和糖果形冷屏的实例可借鉴<sup>[5~8]</sup>,但在计算方法上,需要对不同形状的冷屏做不同的化简近似,只适用于这几种形状的冷屏,难以推广。文献[4]中提出了光线统计法计算光度无效性,对任意形状的冷屏皆适用,但其运算速度较慢,如用在冷屏的优化中将严重影响优化效率。因此,探索出对任意形状皆适用的快速计算方法非常必要。本文介绍一种计算任意形状冷屏光度无效性的方法,此方法能应用于各种形状冷屏的计算,运算速度明显优于光线统计法。

## 2 光度无效性的定义式

在定义冷屏的光度无效性之前,先引入两个和通光立体角有关的特征参数,即探测器单元对应的有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 和总立体角 $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 。由辐射度学原理可知,辐射能量与立体角大小成正比,因此每个探测器单元对应的通光立体角大小直接反映了接收

辐射能的多少<sup>[9]</sup>,也就是从探测器往回看到通光能量的多少。

有效立体角是探测器第*i*个单元被光学系统光瞳边界所围成、并且不被冷屏边界阻挡的立体角,在立体角范围内包含的光线是能够同时透过光瞳和冷屏的信号光;总立体角是冷屏边界对探测器第*i*个单元所围成的立体角,其包含的光线既有信号光,又有系统内部件产生的杂散光。有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 和总立体角 $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 都是探测器单元序号*i*的函数。

图1显示了系统存在渐晕的情况下,有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 和总立体角 $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 的示意图。图1(a)中,光敏元*i*位于焦平面阵列中心,有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 仅由光瞳边界确定;但图1(b)的光敏元*i*位于焦平面阵列边缘,由于系统渐晕,冷屏对透过光瞳的部分能量有所阻挡,有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 必须由光瞳边界和冷屏边界共同确定;总立体角 $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 均由冷屏边界单独确定。

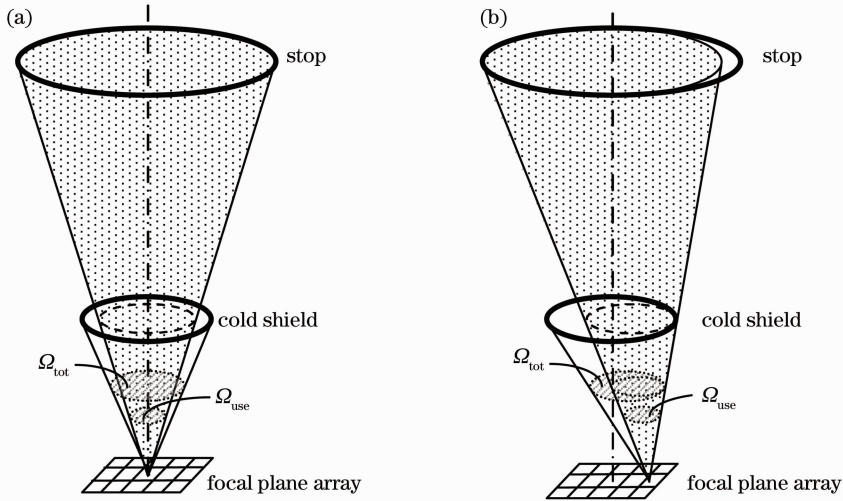


图1 有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 和总立体角 $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 示意图。(a) 光敏元*i*位于焦平面中心;(b) 光敏元*i*位于焦平面边缘  
Fig. 1 Sketch of useful solid angle  $\Omega_{\text{use}}(i)$  and total solid angle  $\Omega_{\text{tot}}(i)$ . (a) Elementary *i* located at the center of focal plane; (b) elementary *i* located at the edge of focal plane

冷屏的光度无效性 $X_{\text{PI}}(i)$ 反映通过冷屏开孔的杂散能量相对于信号能量的大小,衡量冷屏对杂散光抑制的无效程度,是随探测器单元位置序号*i*变化的函数<sup>[10]</sup>:

$$X_{\text{PI}}(i) = \frac{\Omega_{\text{tot}}(i)}{\Omega_{\text{use}}(i)}. \quad (1)$$

冷屏与光瞳完全匹配时 $X_{\text{PI}}(i)$ 值最小,并且等于1。 $X_{\text{PI}}(i)$ 值越大,则探测器接收的相对杂散辐射越多; $X_{\text{PI}}(i)$ 值随*i*的变化越明显,则像面各位置的相对杂散辐射照度越不均匀。

$X_{\text{PI}}(i)$ 是衡量冷屏在系统中作用效能的一个非常有意义的参数。对于系统中设计合理的冷屏,它必须能够使到达探测器的杂散能量抑制在较小范围,并能保证接收的辐射能量比较均匀<sup>[11]</sup>,易于通过信号处理滤除,它的 $X_{\text{PI}-i}$ 曲线一定是均值低且相对平坦的曲线;如果 $X_{\text{PI}-i}$ 曲线均值和起伏较大,则说明系统中的冷屏设计不够合理。冷屏效率也是反映冷屏作用效能的另一参数,它与位于像面中心单元的光度无效性互为倒数。冷屏效率仅能反映中心像元对能量的接收情况,而不能反映整个像平面的能量

分布状况,所以,光度无效性比冷屏效率更能全面地衡量冷屏的作用。

由此看来,要准确评价冷屏在系统中的优劣性,需对冷屏的光度无效性  $X_{PI}(i)$  进行计算,得出其分布的  $X_{PI-i}$  曲线。

### 3 用叠加积分法计算通光立体角

由(1)式可知,冷屏光度无效性的计算实质上是  $\Omega_{use}(i)$  和  $\Omega_{tot}(i)$  两个通光立体角的计算。在辐射度学中,通光立体角的求取通常采用计算球冠面积的方法<sup>[12]</sup>,或者曲面积分法<sup>[13]</sup>。计算球冠面积的方法一般用于计算形状简单、规则的冷屏,并且需要作一定程度的近似,使用范围比较受限;曲面积分法需要通过解析式,对于形状不规则的冷屏计算也十分复杂。在文献[4]中提到逆向追迹光线的统计计算方法,该方法有较高的准确度和较广的适用性,但缺点是在保障精度的前提下,需要追迹大量的光线,影响运算速度。本文提出一种新的叠加积分的方法计算通光立体角。

在球坐标系下,立体角  $\Omega$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\Omega = \iint_{D_{\varphi\theta}} \sin \varphi d\varphi d\theta, \quad (2)$$

式中所选坐标是以立体角顶点为中心的球坐标; $\varphi$ 、 $\theta$  分别为球坐标系下的极角坐标和圆周角坐标; $D_{\varphi\theta}$  为  $\varphi$  和  $\theta$  的积分区域。在积分区域中, $\varphi$  和  $\theta$  是不是两个独立变量,而是相关变量,要计算二重积分比较困难,因此可利用微积分学的思路,将积分运算转换为叠加运算,通过分割、近似、求和的步骤来计算二重积分。其基本方法是:把积分变量的区域等分为  $N$  个小区间,区间大小为  $\Delta$ ,同一个区间里的所有变量对应的被积函数值都近似相等,其值为  $f_n$ ,再将每个区间里的  $f_n$  和  $\Delta$  相乘后叠加,得到的就是积分近似值。 $N$  取值越大,计算精度越高。

#### 3.1 冷屏、光瞳和探测器的数学模型建立

冷屏形状可能是不规则的,但一般为对称形,具有对称中心,它的边界方程在以对称中心为基准的原始平面坐标系下表达式为

$$f_c(x, y) = 0. \quad (3)$$

光瞳形状通常是圆形,半口径为  $r_p$ ,其边界在原始平面坐标系下由

$$x^2 + y^2 = r_p^2 \quad (4)$$

确定,对每一个探测器单元  $i$ ,其对应的  $\Omega_{use}(i)$  或  $\Omega_{tot}(i)$  都具有不同取值,为了方便,在计算每个光敏元  $i$  对应的通光立体角时,都各自建立一个空间直角

坐标系。探测器单元  $i$  的位置为坐标原点,焦平面为  $xoy$  平面,原点到光瞳平面的垂线为  $z$  轴。假设第  $i$  个探测器光敏元相对于阵列中心的坐标为  $(x_{0i}, y_{0i})$ ,在其新坐标系下冷屏和光瞳的边界方程分别为

$$\begin{cases} f_c(x - x_{0i}, y - y_{0i}) = 0 \\ z - z_c = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} (x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2 = r_p^2 \\ z - z_p = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $z_c$  和  $z_p$  分别为冷屏和光瞳平面到探测器焦平面的距离。在此数学模型中,当计算(2)式的积分时,将完成空间直角坐标系和球坐标系的相互转换。

#### 3.2 总立体角 $\Omega_{tot}(i)$ 的计算

在 3.1 节建立的数学模型基础上,利用(2)式和叠加积分法可计算每一个探测器单元  $i$  对应的总立体角  $\Omega_{tot}(i)$ 。根据叠加积分法的思路,将  $2\pi$  的平面圆周角划分为  $N$  等分,每一等分的角间隔  $\Delta\theta$  等于  $2\pi/N$ ;在第  $n$  个角间隔内任取一个值  $\theta_n$ ,它在冷屏的边界上有一对应的坐标点  $(x_n, y_n, z_c)$ ,如图 2 所示,与坐标点相应的  $\varphi_n$  值可由以下算式求得

$$\varphi_n = \arccos\left(\frac{z_c}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_c^2}}\right), \quad (7)$$

此时,(2)式由二重积分式转化为叠加式:

$$\Omega_{tot} = \sum_{n=1}^N \Delta\theta \int_0^{\varphi_n} \sin \varphi d\varphi = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{N} (1 - \cos \varphi_n). \quad (8)$$

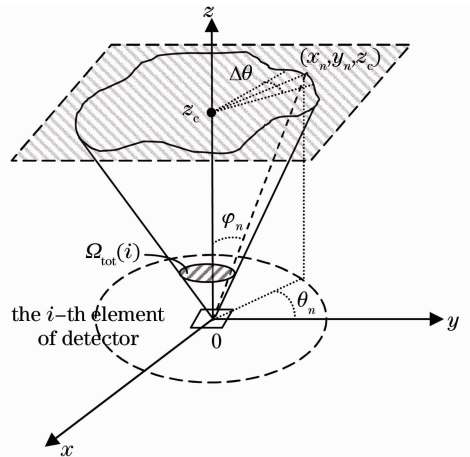


图 2 总立体角  $\Omega_{tot}(i)$  计算示意图

Fig. 2 Sketch of total solid angle  $\Omega_{tot}(i)$  calculating

上述过程通过编写程序可以实现,对于探测器单元  $i$ ,只要求出冷屏边界  $N$  个  $\theta_n$  值对应的  $\varphi_n$ ,再利用(8)式进行叠加。只要  $N$  值取得足够大,就能得到精确的  $\Omega_{tot}(i)$ 。

### 3.3 有效立体角 $\Omega_{\text{use}}(i)$ 的计算

在没有系统渐晕的情况下,有效立体角  $\Omega_{\text{use}}(i)$  的求取与  $\Omega_{\text{tot}}(i)$  类似,只要将冷屏的边界换为光瞳边界,用相同的方法计算即可。但是,如果存在系统渐晕,从光敏元的位置来看,透过光瞳边界的光线可能在冷屏边界之外,此时,有效立体角则由光瞳边界和冷屏边界共同限制而成。所以,在利用叠加积分法时,需要对每一个  $\theta_n$  计算出它与光瞳边界对应的  $\varphi_{pn}$  以及与冷屏边界对应的  $\varphi_{cn}$

$$\begin{cases} \varphi_{pn} = \arccos\left(\frac{z_p}{\sqrt{x_{pn}^2 + y_{pn}^2 + z_p^2}}\right) \\ \varphi_{cn} = \arccos\left(\frac{z_c}{\sqrt{x_{cn}^2 + y_{cn}^2 + z_c^2}}\right) \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $(x_{pn}, y_{pn}, z_p)$  为第  $n$  个  $\theta_n$  值在光瞳边界上对应的坐标值;  $(x_{cn}, y_{cn}, z_c)$  为第  $n$  个  $\theta_n$  值在冷屏边界上对应的坐标值。取  $\varphi_{pn}$  和  $\varphi_{cn}$  的最小值作为  $\varphi_n$  后,再进行叠加计算,即可得光敏元  $i$  到看到的有效立体角  $\Omega_{\text{use}}(i)$  为

$$\Omega_{\text{use}} = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{N} (1 - \cos \varphi_n) = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{N} \{1 - \cos[\min(\varphi_{pn}, \varphi_{cn})]\}. \quad (10)$$

### 4 光度无效性的计算程序和实例

前文所述的叠加积分法求出有效立体角  $\Omega_{\text{use}}(i)$  和总立体角  $\Omega_{\text{tot}}(i)$  之后,用(1)式即可计算出冷屏的光度无效性  $X_{\text{pl}}(i)$ 。将以上计算思路编写为程序,最终可以计算出  $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 、 $\Omega_{\text{use}}(i)$  和  $X_{\text{pl}}(i)$  随光敏元位置  $i$  的分布曲线,具体运算流程如图3所示。叠加积分法和文献[4]中提及的光线统计法有相似的特点,即两种算法的计算精度和速度都依靠控制取点数来控制,取点数越多,精度越高,相应速度越慢;当取点达到一定的数量,再增加取点数时,计算结果越来越趋于统一,因此可用取点数目增加后与增加前的浮动量来表示计算精度。

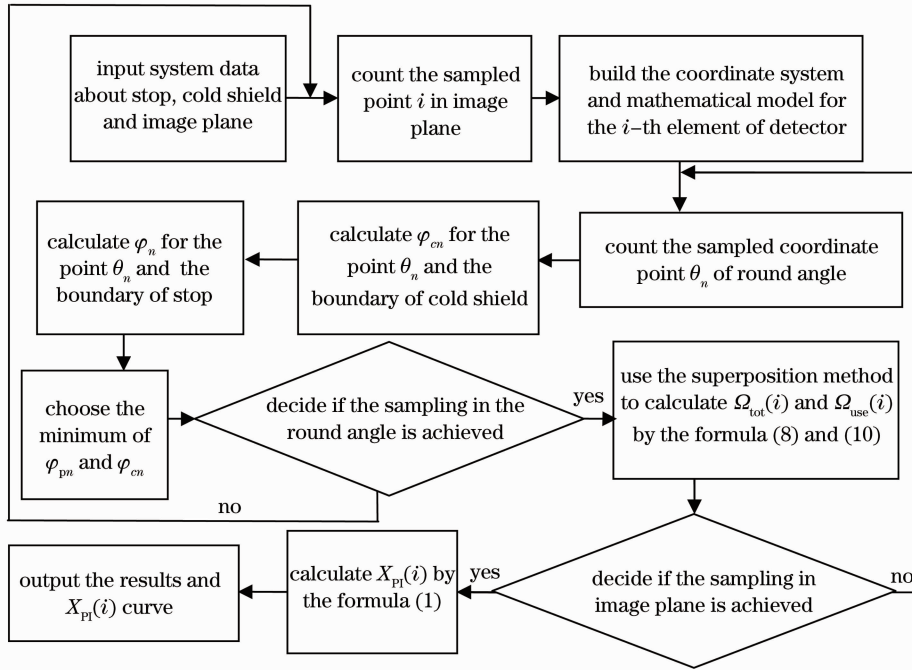


图3 叠加积分法计算  $X_{\text{pl}}(i)$  流程图

Fig. 3 Calculating flow chart of superposition integral method

叠加积分法在计算速度和精度上更具优势:如果要求两种算法达到相同的精度,叠加积分法需要取的点更少,速度更快;如果要求二者达到相同的速度,用叠加积分法则允许增加更多的取点数,精度更高。由于叠加积分的优势,此程序具有运算速度快、计算精度高、对任意形状的冷屏皆适用等优点,这将在实例中与光线统计法进行对比验证。

为了验证前文设计的算法的实用性,本文选取国外某款扫描型热像仪,针对其光学系统中配置的两种形状冷屏,用叠加积分法进行光度无效性的计算,并用文献[4]中提及的光线统计法的计算结果与之对比。两种形状的冷屏分别为类椭圆形冷屏和异形冷屏,外形尺寸如图4所示,前者形状平滑,后者形状复杂,选择形状特点不同的冷屏进行计算,更能

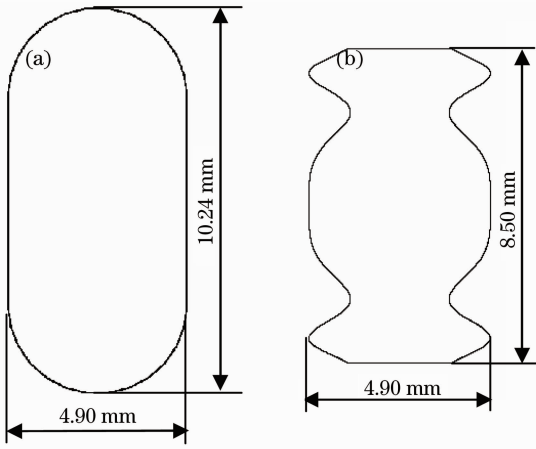


图 4 (a)类椭圆形冷屏和(b)异形冷屏外形示意图  
Fig. 4 Diagram of (a) ellipse-like and (b) abnormally shaped cold shield

充分地比较和验证文中所设计算法精确度和适用度。

该产品所使用的  $288 \times 4$  探测器是线列形探测器,为了简化计算,在程序中只在线列的一维方向取点,研究光度无效性在线列方向的分布,这样可提高运算速度。在该热像仪中使用的类椭圆形冷屏和异形冷屏的区域边界分别为

$$\begin{cases} |x| \leq 2.45 \\ |y| \leq 2.67 + \sqrt{2.45^2 + x^2} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} |y| \leq 4.25 \\ |x| \leq 2.45 - 0.56 \cdot [1 - \cos(0.49y^2)] \end{cases}. \quad (12)$$

热像系统的光瞳为圆形口径,它的区域边界条件为  $x^2 + y^2 \leq 6.15^2$ . (13)

在编写的程序中,运用叠加积分的方法计算立体角时,对圆周角  $\theta$  采样 500 个点,通过上述编制的程序,分别计算类椭圆形冷屏和异形冷屏的  $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 、 $\Omega_{\text{use}}(i)$  及  $X_{\text{PI}}(i)$  值,得到的结果与光线统计法追迹  $10^6$  条光线的计算结果进行比较,线列方向 288 个单元的分布状况如图 5 和图 6 所示,其中横坐标表示探测器线列方向单元  $i$  的序号,纵坐标分布表示  $\Omega_{\text{tot}}(i)$ 、 $\Omega_{\text{use}}(i)$  和  $X_{\text{PI}}(i)$  的数值。

### 1) 类椭圆形冷屏

对于探测器线列方向的 288 个点,两种方法对类椭圆形冷屏计算得到的光度无效性最大差值百分比为 0.97%,平均差值百分比为 0.86%。

### 2) 异形冷屏

对于探测器线列方向的 288 个点,两种方法对类椭圆形冷屏计算得到的光度无效性最大差值百分比为 2.07%,平均差值百分比为 1.08%。

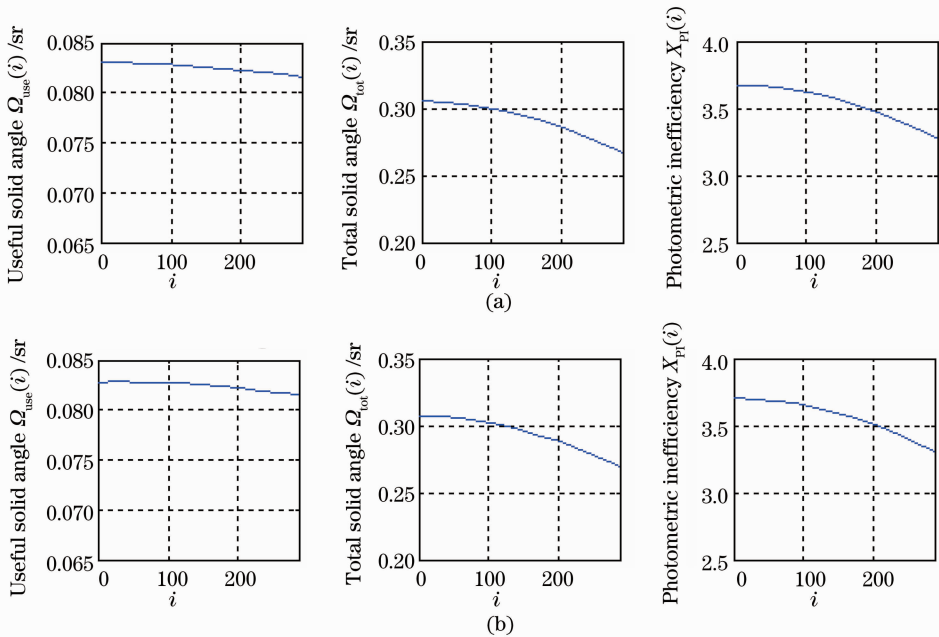


图 5 (a) 叠加积分法和 (b) 光线统计法计算得到的类椭圆形冷屏  $\Omega_{\text{use}}(i)$ 、 $\Omega_{\text{tot}}(i)$  及  $X_{\text{PI}}(i)$  分布图  
Fig. 5  $\Omega_{\text{use}}(i)$ 、 $\Omega_{\text{tot}}(i)$  and  $X_{\text{PI}}(i)$  distribution diagram for ellipse-like shaped cold shield calculated by (a) superposition integral method and (b) ray tracing statistical method

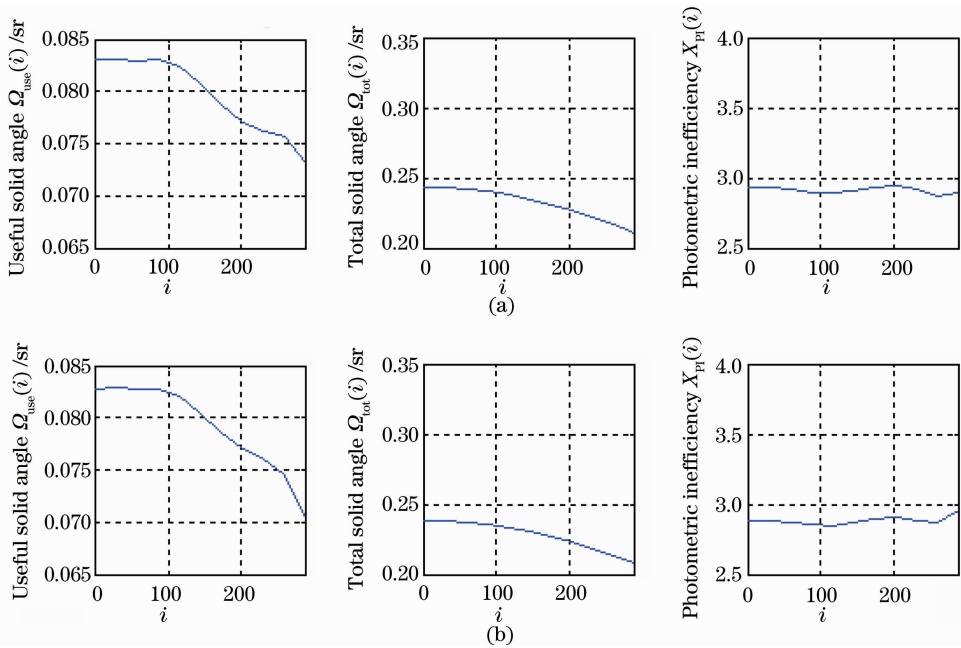


图 6 (a)叠加积分法和(b)光线统计法计算得到的异形冷屏的 $\Omega_{use}(i)$ 、 $\Omega_{tot}(i)$ 及 $X_{PI}(i)$ 分布图  
Fig. 6  $\Omega_{use}(i)$ ,  $\Omega_{tot}(i)$  and  $X_{PI}(i)$  distribution diagram for abnormally shaped cold shield calculated by (a) superposition integral method and (b) ray tracing statistical method

由计算结果可知,无论用哪一种方法计算,异性冷屏的光度无效性曲线都优于类椭圆形冷屏,说明该产品中,异性冷屏的设计更合理。再对两种算法进行比较:用叠加积分法和光线统计法计算得到的光度无效性随探测器线列方向的分布基本接近,每个像元对应的相差量都很小;由于异形冷屏形状起伏较大,所以两种方法得到的光度无效性差值百分比略大于类椭圆形冷屏,但也控制在较小的范围内。这说明所编程序的计算结果能够比较准确地反映光度无效性的分布趋势。

本例对计算精度的要求设定为:增加取点数后,计算结果的浮动量小于0.1%。光线统计法从光线发射方向的两个分量来控制取点数,对于形状起伏较大的冷屏,需要追迹更多的光线,当追迹的光线总数大于 $10^6$ ,即取点数大于 $10^6$ 时,计算得到的 $\Omega_{tot}(i)$ 、 $\Omega_{use}(i)$ 和 $X_{PI}(i)$ 值浮动量小于1%;而叠加积分法的精确度只受一个变量的影响,即圆周角 $\theta$ 的取点数 $N$ ,当 $N$ 大于500时, $\Omega_{tot}(i)$ 、 $\Omega_{use}(i)$ 和 $X_{PI}(i)$ 的值浮动量小于0.1%,也就是说,在精度要求一致的前提下,叠加积分法的采样数目仅为前者的1/2000,速度为前者的数百倍。所以,叠加积分法比光线统计法更容易实现高精度、高速度。

两种算法对任意形状的冷屏都具通用性,不过,当像面尺寸远大于冷屏尺寸时,叠加积分的算法需要重新改进才能使用,而光线统计法不受任何尺寸

的限制。但是,这种情况在实际的热成像光学系统中极少出现。

综合看来,叠加积分法虽然在极少情况下受到一些限制,但可以通过改进算法弥补此缺陷,而且在大多数时候,它在精度和速度上较光线统计法更具优势,用它来计算光度无效性不仅能够精确地评价冷屏的作用,而且更加适用于大计算量的冷屏优化过程。

## 5 结 论

提出了利用叠加积分计算冷屏光度无效性的方法,在建立的数学模型基础上,以分割和叠加运算实现二重积分,从而求得每个探测器单元对应的总立体角 $\Omega_{tot}(i)$ 、有效立体角 $\Omega_{use}(i)$ 和光度无效性 $X_{PI}(i)$ 。选择一个实际的系统,对两种冷屏各用叠加积分法和光线统计法进行光度无效性进行计算,通过对结果的比较可知,叠加积分的算法具有运算速度快、精度高的特点。该算法不仅能够准确定量分析冷屏的优劣性,也为将来进一步研究冷屏形状的优化设计完成了最核心的工作。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Yang, An Xiaoqiang, Wang Qian *et al.*. Analysis and control of Narcissus effect of long-wavelength cooling infrared imaging system based on optical defocusing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422003

- 刘洋, 安晓强, 王茜等. 基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0422003
- 2 Liu Yang, An Xiaoliang. Analysis and control of Narcissus effect of cooling ir focal plane system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222007
- 刘洋, 安晓强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0222007
- 3 Zhang Yan, Fang Jiexiong. Noise analysis of HgCdTe photoconductive detector with different response wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1369~1373
- 张燕, 方家熊. 不同响应波长的 HgCdTe 光导器件噪声分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1369~1373
- 4 Yang Kaiyu, Jin Ning, Cao Ling *et al.*. Calculation of energy distribution in image plane for all shapes of cold shields[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(7): 1721~1726
- 杨开宇, 金宁, 曹凌等. 任意冷屏对应的像面能量分布状况的计算[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(7): 1721~1726
- 5 Wang Yifeng, Zhuang Jisheng, Mao Jingxiang. Calculation of field angle of candy shape cold shield with Monte Carlo method and Matlab[J]. *Infrared*, 2009, **30**(11): 45~48
- 王忆锋, 庄继胜, 毛京湘. 用蒙特卡罗方法和 Matlab 计算糖果形冷屏的视场角[J]. 红外, 2009, **30**(11): 45~48
- 6 Wang Yifeng, Fan Naihua. Computation of angle of viewing field of track field shape cold shield with Monte Carlo method and Matlab[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(3): 274~276
- 王忆锋, 范乃华. 用蒙特卡罗方法和 Matlab 计算田径场形冷屏的视场角[J]. 激光与红外, 2009, **39**(3): 274~276
- 7 Wang Yifeng, Fan Naihua, Zhuang Jisheng. Changing trends of pixel solid angles of long linear device under circular cold shield and its imaging simulation [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(11): 631~633
- 王忆锋, 范乃华, 庄继胜. 圆形冷屏下长线列器件光敏元立体角的变化趋势及其成像仿真[J]. 红外技术, 2009, **31**(11): 631~633
- 8 Li Jianlin, Sun Juan, Zhou Xiaojun. Method of accurate calculation of solid angle cold shield for infrared focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(5): 1153~1157
- 李建林, 孙娟, 周效军. 精确计算红外焦平面冷屏立体角的方法[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(5): 1153~1157
- 9 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 768~771
- 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 768~771
- 10 Bertrand Forestier, Joël Rollin, Dominique Ragot. Optical Architecture for Infrared Viewing System [P]. United States, US006181486B1, 2001
- 11 Yang Shengjie. Optical design for high resolution cooled mid-wavelength infrared wide-angle imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0822003
- 杨胜杰. 高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0822003
- 12 An Liansheng. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002
- 安连生. 应用光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- 13 Lei Guilin, Bao Shiyuan, Zhang Biao. Solid angle and its applications in physics [J]. *J. Gansu Education College (Natural Science Ed.)*, 1992, (2): 51~56
- 雷桂林, 鲍世远, 张彪. 立体角及其在物理中的应用 [J]. 甘肃教育学院学报(自然科学版), 1992, (2): 51~56
- 14 Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua *et al.* The Calculation of Infrared Radiation and Transfer [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006
- 谈和平, 夏新林, 刘林华等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006

栏目编辑: 李文喆