

# 各向异性发射球体热红外辐射概率特性

黄勇\*, 崔雪, 张元君

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:**针对红外探测制导和检测等研究的热点问题,探讨了目标红外辐射的方向性对红外探测的影响.以各向异性等温球体为研究对象,建立从目标到探测器敏感面阵的红外传输整体模型.以能量概率密度分布函数为基础,构造敏感面上单元格的能量描述方法.采用蒙特卡洛法,计算单元格的红外信号强度,分析红外小目标的方向辐射特性对探测敏感面上能量分布的影响.结果表明,当目标表面半球方向发射率一定时,提高法向发射率可显著增强目标中心所在像元的红外信号强度,增大目标像元间红外信号对比度.

**关键词:**红外辐射;方向发射率;能量份额;能量概率密度

**中图分类号:**TK124 **文献标识码:**A

## Probability characteristics of thermal infrared radiation for anisotropic spheres

HUANG Yong\*, CUI Xue, ZHANG Yuan-Jun

(School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In accordance with the hot issues of infrared detection and guidance, an IR transmission process from target to sensitive array was established to explore the IR signatures of an anisotropic-isothermal sphere model. The energy probability density distribution function was employed to describe the energy intensity levels of sensitive array units. The energy distributions of detector units were obtained with the aid of the Monte Carlo Method. The relationship between target directional IR radiation characteristics and energy distributions on the sensitive array was revealed. It indicates that in the case of the equal hemispherical emissivity of far-field small targets, increasing the emissivity in the near-normal direction can appreciably enhance the IR intensity of the image-center unit and improve the IR intensity contrast among the image units.

**Key words:** infrared radiation; directional emissivity; energy proportion; energy probability density

**PACS:** 44.40.+a

### 引言

利用热红外特性对目标进行探测制导、识别、检测已成为各国研究的热点<sup>[1,2]</sup>.由于受到背景杂散辐射、大气吸收与散射、光学效应、探测响应的非均匀性等多种因素的影响,经远距离探测到的红外小目标通常表现出低能量、小尺寸、几何形状模糊,难于探测等特点<sup>[3,4]</sup>,因此,目标的红外特性在不同研究领域常常作均一化近似处理.如在对红外小目标探测概率进行评估时,通常忽略目标成像所占单元

格之间的能量分配,仅仅考察目标成像的能量均值与探测到背景能量的对比关系<sup>[5]</sup>.在实时红外仿真图像研究中,对目标进行连续多帧拍照时,由于受瞬时时间和空间效应的影响,通常将小目标的尺寸、能量强度、运动速度、出现频率等参数随机化处理,即在各帧中各参数值在一定范围内均匀随机分布<sup>[4]</sup>.另外,在基于红外小目标检测方法,为了考虑到光学系统衍射影响,也通常使用二维高斯模型来对红外小目标进行建模<sup>[6]</sup>.然而,这些对小目标信号的处理方法都是基于辐射信号传输中,对相关影响因素

收稿日期:2012-08-20,修回日期:2013-02-05

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20121102110015)

Foundation items: Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20121102110015)

作者简介(Biography):黄勇(1974-),男,江西东乡人,教授,博士,主要研究领域为红外辐射传输、人机与环境工程.

\*通讯作者(Corresponding author):E-mail: huangy\_zl@263.net

Received date: 2012-08-20, revised date: 2013-02-05

的综合考量来建立的目标模型,均没有考虑目标表面各向异性发射对探测敏感面上能量信号的影响。

近几年纳米科技的发展和负折射率材料的研制改变了传统观念. 国内外研究人员相继通过理论或实验发现,通过对表面微结构或负折射率薄膜的调制来控制材料表面红外辐射的波长和方向,可获得红外窄波段内一定方向上相干性热辐射<sup>[7-10]</sup>. 这些研究表明,随着科技的发展,人为控制材料表面热红外辐射的方向特性将变得更加容易,可望在技术领域得到应用. 这些新现象也启发我们思考一些新问题. 例如,如果物体表面的热红外辐射在某一个特定红外窗口波段的半球发射率无法再降低,能否通过改变红外辐射的能量在不同方向的分布,达到降低目标被发现的概率. 这样需要深入研究目标的各向异性发射对成像的影响。

目前对于目标探测研究所发展的方法中,默认了目标的材料表面是各向同性发射. 为了说明各向异性发射的影响,本文建立了从目标到光学透镜再到敏感面阵的整体红外传输模型,从基本的红外传输角度入手进行考察. 选取等温球体为研究对象,这是因为等温球体的各向异性发射特性不影响到达敏感面的总红外辐射能量,说明各向异性发射的影响更具一般性. 在此基础上考察球体表面不同方向发射率分布对探测器敏感面上能量分布特性的影响,忽略背景杂散辐射、大气吸收与散射、光学效应、探测响应的非均匀性等次要因素的影响。

## 1 物理模型与假设

图 1 是球体目标与探测器构成的系统简图. 探测器的视场角为  $\Omega_s$ , 目标的半径为  $R_t$ , 位于视场中心附近, 目标与镜头的距离为  $H$ . 目标在敏感面阵上所成的像是半径为  $R$  的圆. 根据  $H$  的大小不同, 目标与探测距离所对应的立体角为  $\Omega_t$  以及成像半径  $R$  的值均不同. 球体目标的温度均匀分布为  $T$ , 表面方向发射率为  $\varepsilon(\theta)$ ,  $\theta$  为球体表面某点的发射方向与该处法线的夹角. 图 2 所示, 敏感面阵的信号接收表面由多个信号接收单元组成, 信号接收单元为边长为  $l$  正方形(忽略接收单元之间的间距). 图中灰色大圆为目标成像示意图, 黑色小圆特指直径等于探测单元格边长  $l$  的点目标. 为了简化模型, 我们做如下假设:

(i)  $R_t$  相对  $H$  是一个小量, 即  $\Omega_t$  很小, 目标表面沿着光轴到达敏感面阵的辐射能与中心线的夹角可忽略不计;

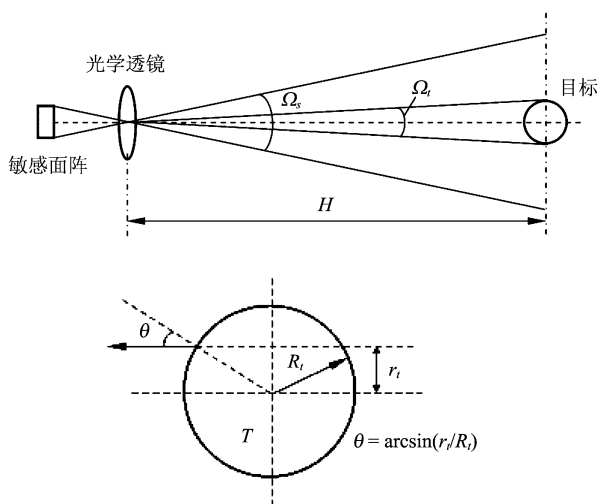


图 1 目标成像过程系统简图  
Fig. 1 Sketch map of the target imaging process

(ii) 半径为  $R$  的像中某点  $r$  所接受到的红外辐射能量密度  $Q(r)$ , 与该点所对应的目标辐射点的热辐射强度  $I$  成正比, 即

$$Q(r) \propto I(\theta), (0 < r < R) \quad (1)$$

式(1)中

$$\theta = \arcsin(r_t/R_t) = \arcsin(r/R) \quad (2)$$

$r_t$  为目标中与像中位置  $r$  对应的位置, 如图 1 所示.

此外,  $I(\theta) = \varepsilon(\theta)I_b$ ,  $I_b$  为温度  $T$  下的黑体辐射强度. 落在敏感面阵上总的能量  $Q_t$  为

$$Q_t = \int_0^R 2\pi r Q(r) dr \quad (3)$$

(iii) 忽略目标的热辐射在传输过程的衰减, 或认为目标不同位置处的热辐射到达探测器信号接收表面不同位置的衰减率相同.

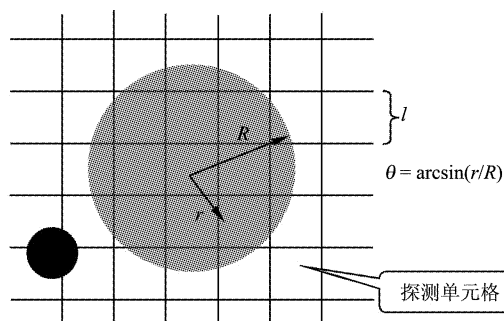


图 2 探测单元模型及像模型  
Fig. 2 Schematic of detector units and image model

## 2 计算方法

### 2.1 成像表面的能量分布函数

当目标表面材料的定向发射率为  $\varepsilon(\theta)$  时, 它的

平均半球发射率 $\bar{\varepsilon}$ 为

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{\pi/2} 2\varepsilon(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (4)$$

到达探测器的红外辐射能量 $Q$ 与目标材料的方向发射率 $\varepsilon(\theta)$ 及半球发射率 $\bar{\varepsilon}$ 有如下关系:

$$Q \propto \int_0^R 2\pi r \varepsilon[\arcsin(r/R)] dr \quad (5)$$

根据方程(2)可以得到

$$Q \propto 2\pi R \int_0^{\pi/2} \varepsilon(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta \propto \bar{\varepsilon} \quad (6)$$

这表明对于球体目标,只要材料的半球发射率不变,到达敏感面上总的能量不变.定义一个归一化的方向发射率 $\tilde{\varepsilon}(\theta)$

$$\tilde{\varepsilon}(\theta) = \frac{\varepsilon(\theta)}{\bar{\varepsilon}} \quad (7)$$

根据式(7)定义的 $\tilde{\varepsilon}(\theta)$ 可以看作是辐射能量的角度分配函数.

由式(1)可以知道 $Q(r)$ 与 $\varepsilon(\theta)$ 成正比关系.为了考察 $Q(r)$ 的分布情况,定义两个成像表面的无量纲能量径向分布函数

$$Q_1(r) = \varepsilon(\theta) \quad (8)$$

$$Q_2(r) = \tilde{\varepsilon}(\theta) \quad (9)$$

其中式(8)是根据物体表面方向发射率定义的能量径向分布函数;式(9)是基于物体表面半球空间辐射能量相同,而角度分配不同所定义的能量径向分布函数.二者虽然仅存在一个比例系数的差异,但表达的内容是不一样的.

此外,将 $Q_1(r)$ 和 $Q_2(r)$ 做归一化处理,其结果形式一致,为

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(r) &= \frac{Q_1(r)}{Q_i} = \frac{Q_1(r)}{\int_0^R 2\pi r Q(r) dr} \\ &= \frac{\varepsilon(\theta)}{\int_0^R 2\pi r \varepsilon(\theta) dr} \quad (0 < r < R) \quad (10) \end{aligned}$$

## 2.2 像中心的坐标

如图3所示,设像中心所在的探测单元编号为 $(0,0)$ ,该探测单元的中心为坐标系 $XOY$ 的原点.像元圆心位于编号为 $(0,0)$ 探测单元中的某点.由于对称性,取八分之一的区域为像中心的分布区域,如图3中灰色部分所示,像中心的坐标为 $(x_0, y_0)$ .

## 2.3 探测单元中的能量

投射到探测单元表面的总能量,构成了探测单元的刺激源.不同探测单元所做出的响应,形成了目标的红外图像.当像的中心在图3中阴影部分随机行走时,根据成像半径的大小不同,目标的辐射能有

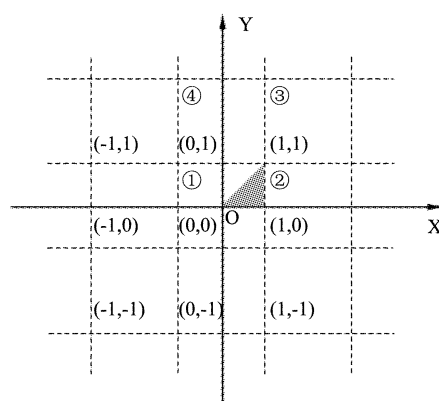


图3 探测单元坐标系及网格示意图

Fig. 3 The coordinate system of detector units

可能落在 $N$ 个探测单元上.对于任意圆心坐标 $(x_0, y_0)$ ,落在每个探测单元上的能量占总能量 $Q_i$ 的份额为 $z_i(x_0, y_0)$ ,则

$$\sum_{i=1}^N z_i(x_0, y_0) = 1 \quad (11)$$

落在第 $i$ 个探测单元的能量份额 $z$ 的概率分布为 $g_i(z)$  ( $0 < z_i < 1, i = 1 \dots N$ ),则每个探测单元的能量概率密度分布 $G_i(z)$ 为

$$G_i(z) = \frac{dg_i(z)}{dz} \quad (12)$$

## 2.4 蒙特卡洛法求解过程

本文利用蒙特卡洛法求解每个探测单元的能量概率密度分布,主要计算过程为:

(i) 像中心的坐标为:

$$x_0 = \frac{1}{2}LM_x; y_0 = \frac{1}{2}LM_y, y_0 \leq x_0 \quad (13)$$

(ii) 成像点位置 $(x_1, y_1)$ 的坐标为:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + R \sqrt{M_r} \sin(2\pi M_\theta) \\ y_1 &= y_0 + R \sqrt{M_r} \cos(2\pi M_\theta) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中 $M_x, M_y, M_r$ 和 $M_\theta$ 均为 $(0,1)$ 之间的随机数.

对于特定的像中心位置,通过在半径为 $R$ 的像区域内取大量投射能束.根据式(8)、(9),对于探测器上每个成像点对应目标处的发射率作为光束能量的权值.所有光束能量的总和即为落到探测器上总的辐照能量.每个探测单元所投射能束的能量与总辐照能量的比值为该探测单元的能量份额 $z_i$ .再通过对象中心位置随机取值,即可得到每个探测单元能量份额的概率分布函数 $g_i(z)$ .

(iii) 每个探测单元的能量概率密度分布函数 $G_i$ 为

$$G_i(z) = \frac{g_i(z) - g_i(z - \Delta z)}{\Delta z} \quad (15)$$

### 3 红外特性分析

#### 3.1 点目标能量概率密度曲线

每个探测单元是根据它接收到的总的红外辐射进行响应. 目标在较远处被发现对于目标的生存率有很大影响. 若目标红外图像刚好被压缩在敏感面阵的一个分辨单元格内, 即所成像的直径刚好等于一个探测单元格边长  $l$ , 此时目标球体可视为点目标. 受瞬时时间效应的影响, “像”圆心在单元格内的位置在图像各帧中并非固定不变, 而是具有偶然性, 瞬时跳动. 由于对称性, 我们取单元格八分之一区域均匀分布的随机函数描述这一跳动过程, 如图 3 所示. 显然目标能量信号将占据敏感面上 1~4 个单元 (如图 2 中的小黑圆). 其中, “像”的圆心所在的单元格接收的红外辐射最多, 占到达敏感面总辐射的 25~100%, 它的输出信号最亮. 其他三个单元各自接受的红外辐射占总投射辐射的 0~50%. 根据方程(15)统计“像”圆心所在单元格在各离散能量份额段的能量概率密度值, 经样条插值法拟合, 可得单元格能量概率密度曲线 (energy probability density curve, EPDC) 分布. 在保证半球发射率不变的情况下, 我们考察三个特殊的方向发射来说明红外辐射方向特性对探测单元格接收到红外辐射份额的影响.

图 4(a) 所示红外辐射是各向同性朗伯体 ( $L_0$ ) 的 EPDC 分布图. 这时所成的“像”各点接收的红外辐射是均匀的, 各单元格接收红外辐射的份额与“像”在该单元格所占的面积成正比. 从图中可以看出, 在中间能量份额  $z = 0.525$  处,  $G(z)$  取得最大值 2.38.

图 4(b) 所示红外辐射集中在各点的法线方向附近的 EPDC 分布图. 以下列三种发射率函数  $N_5$ 、 $N_{15}$ 、 $N_{30}$  为例:

$$N_5: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [0^\circ, 5^\circ]);$$

$$N_{15}: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [0^\circ, 15^\circ]);$$

$$N_{30}: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [0^\circ, 30^\circ]).$$

此时“像”圆心附近单元格接收到红外辐射较大, 其它单元格接收到的投射辐射较小. 有别于朗伯体的是, 此种发射模式下, 目标 EPDC 分布发生了显著变化,  $G(z)$  集中在高能量份额段, 低能量份额段相对较小. 而且, 当法向发射率函数作用的角度范围越小, 其 EPDC 分布则越集中, 且能量概率密度的最

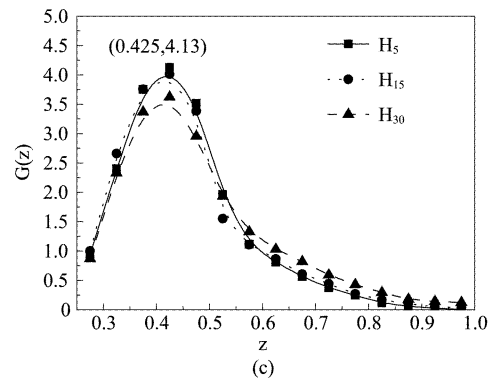
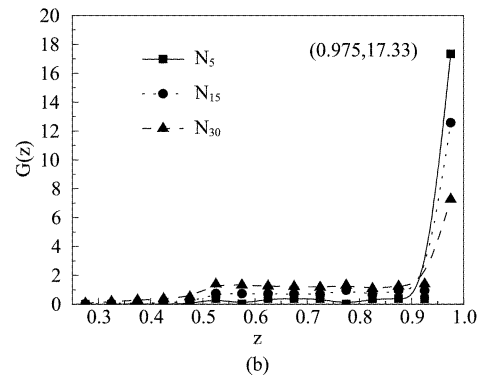
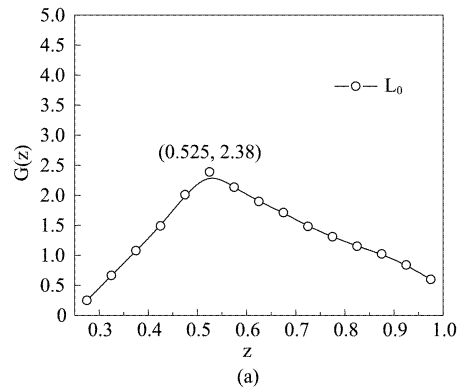


图 4 (a) 朗伯体 ( $L_0$ ) 的能量概率密度图, (b)  $N_5$ ,  $N_{15}$  和  $N_{45}$  的能量概率密度图, (c)  $H_5$ ,  $H_{15}$  和  $H_{45}$  的能量概率密度图

Fig. 4 (a) The EPDC of the Lambert body  $L_0$ , (b) The EPDCs of  $N_5$ ,  $N_{15}$  and  $N_{45}$ , (c) The EPDCs in  $H_5$ ,  $H_{15}$  and  $H_{45}$

大值也越大. 图中  $N_5$  在  $z = 0.975$  处,  $G(z)$  取最大值 17.33.

图 4(c) 所示红外辐射集中在切线方向附近的 EPDC 分布图. 以下列三种发射率函数  $H_5$ 、 $H_{15}$ 、 $H_{30}$  为例:

$$H_5: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [85^\circ, 90^\circ]);$$

$$H_{15}: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [75^\circ, 90^\circ]);$$

$$H_{30}: \varepsilon(\theta) = \text{const.} (\theta \in [60^\circ, 90^\circ]).$$

此时“像”只有边缘处接收到红外辐射, 各探测单元接收红外辐射的份额与“像”的边缘在该探测

单元的弧长成正比. 从图 4c 可以看出, 发射率函数取恒值的角度范围变化对 EPDC 分布的影响不大. 对于  $H_5$ , 最大能量概率密度  $G(z) = 4.13$  在  $z = 0.425$  处取得.

对比图 4(a) ~ (c) 可知, “像” 圆心所在探测单元格的 EPDC 分布与目标方向发射函数有关. 当半球发射率保持不变时, 将方向发射率调制在法线方向附近小角度范围段, 即增强法向发射率, 可以提高高能量份额段的能量概率密度, 在红外图像上, 表现为更强的红外信号.

### 3.2 小目标像元 EPDC 对比度

为了进一步说明远场小目标方向发射率函数对红外信号的影响与“像”半径无关. 我们再考察目标成像直径为两倍单元格边长  $2 \times l$  的情况. 当“像”的圆心在像中心单元格八分之一区域(图 3 中灰色阴影区域)内随机跳动, 考察 1~4 号单元格接收到的红外辐射信号, 图 3 所示.

图 5(a) 所示朗伯体 ( $L_0$ ) “像” 所在单元格 1、2、3、4 的 EPDC 能量信号分布情况. 像中心所在单元格 1 中 EPDC 所占能量份额值较高, 红外信号最强, 且格 1 能量概率密度最大  $G_{1max} = 16.86$  在  $z = 0.325$  处取得.

图 5(b) 所示  $N_5$  方向发射模式下单元格 1、2、3、4 的 EPDC 能量信号分布情况. 格 1 能量概率密度最大  $G_{1max} = 15.34$  在  $z = 0.975$  处取得, 单元格 1 的能量概率密度在高能量份额段取得极值, 且在低能量份额段能量概率密度值较小. 相反, 单元格 2、3、4 的能量概率密度曲线均集中在低能量份额段.

图 5(c) 所示  $H_5$  方向发射模式下单元格 1、2、3、4 的 EPDC 能量信号分布情况. 最大能量概率密度值在单元格 2 产生, 即  $z = 0.175$  时,  $G_{2max} = 16.86$ . 单元格间 EPDC 对比度相比图 5a 和图 5b 较小.

比较图 5(a) ~ (c) 可以看出, 当球体的红外辐射集中在各点的法线方向附近时, 探测单元格间对比度明显高于各向同性球体或球体红外辐射集中在切线方向附近的情况, 目标红外辐射集中在切线方向附近时, 小目标单元格间能量对比度较低. 可见, 当半球发射率保持不变时, 将方向发射率设定在法线方向上小角度范围内, 即增强法线方向发射率, 可以提高像元单元格间红外信号对比度.

## 4 结论

通过以各向异性等温球体为研究对象, 首次探讨了目标的各向异性发射对红外探测的影响. 论文

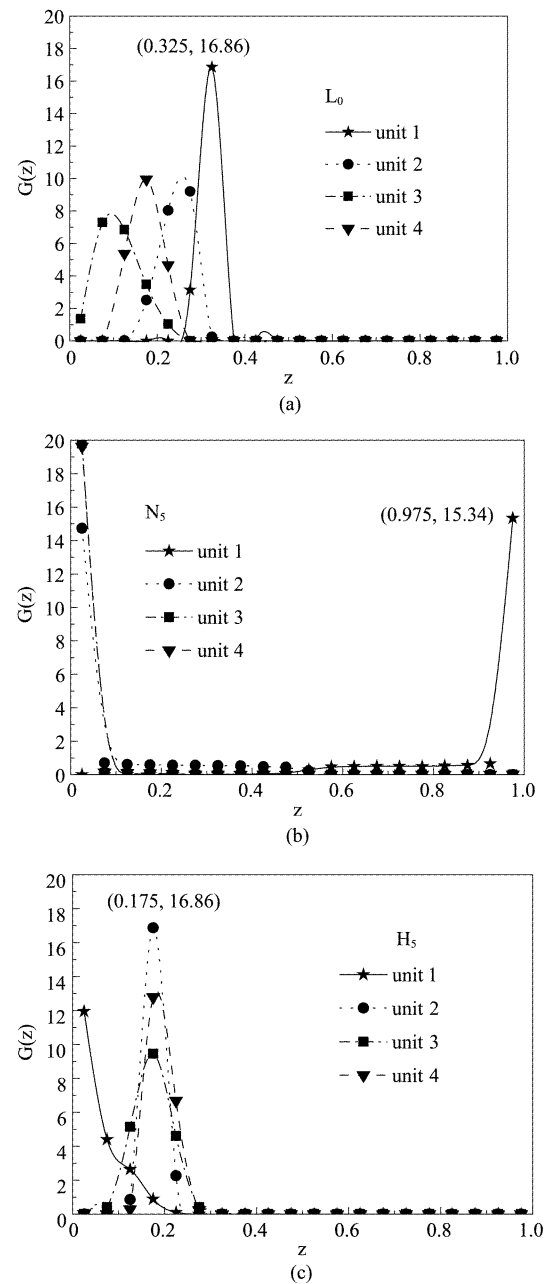


图 5 (a)  $L_0$  时各单元格的能量概率密度曲线, (b)  $N_5$  时各单元格的能量概率密度曲线, (c)  $H_5$  时各单元格的能量概率密度曲线

Fig. 5 Contrast of the EPDCs for (a) the Lambert body  $L_0$ , (b)  $N_5$ , and (c)  $H_5$

的创新工作和主要结论如下:

(1) 从物理模型、能量描述方法和计算方法三个方面, 发展了各向异性发射物体红外辐射特性的研究方法. 它包含红外目标经光学透镜到敏感阵面的整体传输模型、采用能量概率密度函数描述各探测单元的能量分布、蒙特卡洛计算方法.

(2) 研究结果表明, 对于球体小目标, 当半球方向发射率一定时, 到达敏感面的总辐射能不变, 但能

量在不同探测单元格之间的分配随发射率角度分布的不同而改变。

(3) 提高法向发射率可显著增强目标中心所在像元红外信号强度,增大目标像元间红外信号对比度.反之,降低法向发射率则可降低目标中心所在像元红外信号强度,降低目标像元间红外信号对比度。

## REFERENCES

- [1] PIETER A Jacobs. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds [M]. 2nd<sup>E</sup>dition, Washington, SPIE Press, 2006.
- [2] MAHULIKAR S P, SONAVANE H R, RAO G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **43**(7-8), 218.
- [3] YILMAZ A, SHAFIQUE K, SHAH M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(7), 623.
- [4] HUANG K, MAO X. Novel metric of relative characteris-

tics of small targets and backgrounds in infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(10), 103202.

- [5] FEINSTEIN A. Foundations of information Theory [M]. New York, McGraw-Hill, 1958.
- [6] ZHAO Jia-Jia, TANG Zheng-Yuan, YANG Jie, et al. Infrared small target detection based on image sparse representation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵佳佳, 唐峥远, 杨杰等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(2), 156.
- [7] GREFFET J J, CARMINATI R, JOULAIN k, et al. Coherent emission of light by thermal sources [J]. *Nature*, 2002, 416, 61.
- [8] Greffet J J. Applied physics controlled incandescence [J]. *Nature*, 2011, 478, 191.
- [9] DREVILLON J, BEN-ABDALLAH P. Ab initio design of coherent thermal sources [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**(11), 114305.
- [10] HUANG Yong, DONG Su-Jun, YANG Min, et al. Thermal emission characteristics of a graded index semitransparent medium [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, **92**(12-3), 110.

(上接 403 页)

了电子枪的阴栅间距、栅网电压、阳极电压、轴向磁场等重要参数.优化后的结果表明该电子光学系统在碳纳米管冷阴极发射电流密度为  $99 \text{ mA/cm}^2$  时,能产生  $210 \text{ mA}$ 、 $60 \text{ kV}$ 、注电流密度为  $6.7 \text{ A/cm}^2$ 、最大注半径为  $1 \text{ mm}$  的电子注.如果碳纳米管冷阴极的发射电流密度能够达到  $1 \text{ A/cm}^2$ ,则该电子光学系统将能产生注电流大于  $2 \text{ A}$ 、注电流密度大于  $60 \text{ A/cm}^2$  的电子注.这为下一步研制碳纳米管场致发射冷阴极毫米波电真空辐射源器件奠定了基础。

## REFERENCES

- [1] DE HEER W A, CHATELAIN A, UGARTE D. A carbon nanotube field-Emission electron source [J]. *Science*, 1995, **270**(5239): 1179-1180.
- [2] BONARDJ M, MAIER F, STOCKLI T, et al. Field emission properties of multiwalled carbon nanotubes [J]. *Ultramicroscopy*, 1998, **73**(1): 7-15.
- [3] BAUGHMAN R H, ZAKHIDOV A A, DE HEER W A. Carbon nanotubes—the route toward applications [J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 787-792.
- [4] ZHANG Yu, DENG Shao-Zhi, XU Ning-Sheng, et al. Fully sealed carbon nanotube flat-panel light source and its application as thin film transistor - liquid-crystal display backlight [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2008, **26**(3): 1033-1038.
- [5] ZHANG Yu, LIAO Mei-Xiang, DENG Shao-Zhi, et al. In situ oxygen-assisted field emission treatment for improving the uniformity of carbon nanotube pixel arrays and the underlying mechanism [J]. *Carbon*, 2011, **49**(10): 3299-3306.
- [6] CHEN Yi-Ming, ZHANG Hai-Yan, ZHU Qing-Feng, et al.

Synthesis of aligned carbon nanotubes array by radio frequency plasma-enhanced hot filament chemical vapor deposition [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈易明, 张海燕, 朱清锋, 等. 取向碳纳米管阵列的等离子体复合化学气相沉积法制备. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6): 470-474.

- [7] YUAN Xue-Song, YAN Yang, LIU Sheng-Gang. Study on the dispersion relations of a relativistic annular electron beam guided by a finite axial magnetic field [J]. *Acta Phys. Sin.* (袁学松, 鄢扬, 刘盛纲. 有限引导磁场下相对论环形电子注色散特性的研究. *物理学报*), 2011, **60**(1): 212-218.
- [8] SHIFFLER D, ZHOU O, BOWER C, et al. A high-current, large-area, carbon nanotube cathode [J]. 2004, *Ieee Transactions On Plasma Science* **32**(5): 2152-2154.
- [9] SHEN Yi, ZHANG Huang, XIA Lian-Sheng, et al. Research on intense pulsed emission of carbon nanotube cathode [J]. *Acta Phys. Sin.* (谌怡, 张篁, 夏连胜, 等. 碳纳米管阴极强流脉冲发射放气特性研究. *物理学报*), 2011, **61**(7): 072901-1-072901-7.
- [10] YUAN Xue-Song, ZHANG Yu, SUN Li-Min, et al. Study of pulsed field emission characteristics and simulation models of carbon nanotube cold cathodes [J]. *Acta Phys. Sin.* (袁学松, 张宇, 孙利民, 等. 碳纳米管冷阴极脉冲发射特性及仿真模型研究. *物理学报*), 2012, **61**(21): 216101-1-7.
- [11] ELECTRON TUBE DESIGN HANDBOOK COMPILING COMMITTEES. *A handbook for design of electron optics system in microwave tube* [M]. Beijing: National defense industry press (电子管设计手册编辑委员会. *微波管电子光学系统设计手册*, 北京: 国防工业出版社), 1981: 57-157.
- [12] ZHONG Ding-Yong, ZHANG Guang-Yu, LIU Shuang, et al. Universal field-emission model for carbon nanotubes on a metal tip [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 506-508.