

热成像系统前置栅网结构的衍射效应分析 *

刘 斌[†] 金伟其 董立泉

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系 北京 100081)

(2007 年 12 月 28 日收到 2008 年 2 月 27 日收到修改稿)

针对热像仪前置栅网后产生的伪图像,以经典光学理论为基础,利用光的波动性质分析了栅网的前置对热成像影响的衍射作用机理,并且对非单色光目标情况也做了研究分析,进而建立了基于该成像机理下的数学模型。结果表明,当进入实际状态时的各项参数并用 MATLAB 对该模型进行图像仿真后,所得仿真图像与实际当中的伪图像相比较,取得了很好的相似性,达到了模型对这种现象进行描述的预期目的,并提出了需要进一步研究的问题和关键技术。

关键词:热成像,衍射,傅里叶变换,栅网结构

PACC:4230, 4225F, 4280Q, 0762

1. 引言

红外热成像技术是利用目标自身的红外辐射来进行搜索、探测、跟踪和识别的一种高科技技术,被广泛应用于侦察、制导、跟踪、预警等现代武器装备以及许多民用领域,成为国内外竞相重点发展的关键技术之一。实际应用对红外目标的探测和跟踪不断提出更高的要求,既要保证有较高的检测概率又要保证有较低的虚警概率。然而在某些应用中发现,当热成像系统物镜前存在透空的金属栅网时,所得到的热图像会产生伪图像,对高温点目标形成类似衍射的十字形目标像(如图 1),严重影响热成像系统对红外目标的探测、识别和跟踪。

虽然目前尚未查到针对此问题的研究论文,但在一些教科书和相关文章中有部分涉及栅网结构的理论^[1-4],其将成像过程进行简单的抽象化,只给出了理想状态的数学模型,未对影响整个成像过程的参数做充分考虑,因此,难以对实际应用问题进行正确的描述,进而提出工程处理方法。为此,本文从波动光学的基本原理出发,针对实际的应用情况,研究了产生伪图像的成像机理及其规律,分析对成像过程有影响的主要因素,为进一步消除/减小伪图像奠定了理论基础。



图 1 热成像系统前置矩形栅网时的图像

2. 点光源照射栅网的衍射模型

2.1. 单色点光源情况

首先,基于经典的光学衍射理论来分析单色点光源照射栅网结构的衍射光强分布,其模型原理图如图 2。栅网距透镜距离为 d_0 ,点光源 S 距透镜距离为 p ,衍射屏距透镜距离为 q ,并且 p, q 关于透镜成共轭关系。

由波动光学基础理论^[1-3]可知,在旁轴近似和菲涅耳近似处理下,点光源 S 在栅网平面(ϵ, η)前的复振幅分布为

* 总装十一五重点预研项目(批准号:40405050103)资助的课题。

† E-mail: freeman@bit.edu.cn

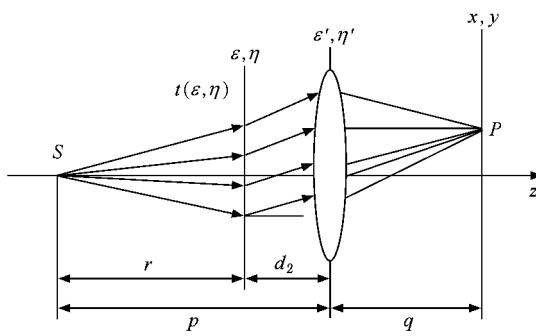


图 2 点光源照射栅网结构的衍射模型

$$E(\varepsilon, \eta, \lambda) = \frac{A(\lambda) \exp(jkr)}{r} \exp\left(jk \frac{\varepsilon^2 + \eta^2}{2r}\right) \quad (1)$$

式中, $A(\lambda)$ 为单色点光源振幅; λ 为光波长; r 为点光源到栅网的距离; j 为复数单位; $jk = 2\pi/\lambda$ 为波矢.

通过栅网后的复振幅分布为

$$E'(\varepsilon, \eta, \lambda) = E(\varepsilon, \eta, \lambda) \kappa(\varepsilon, \eta), \quad (2)$$

式中, $\kappa(\varepsilon, \eta)$ 为栅网的振幅透过调制函数.

按照波动光学的观点, 每一个平面上的光波复振幅分布是前一个平面出射光波衍射复振幅的积分值^[5], 因此, 透镜前的复振幅分布应为

$$\begin{aligned} E(\varepsilon', \eta', \lambda) &= \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} E'(\varepsilon, \eta, \lambda) \frac{\exp(jkd_0)}{d_0} \\ &\quad \times \exp\left(-jk \frac{\varepsilon' \varepsilon + \eta' \eta}{d_0}\right) \\ &\quad \times \exp\left(jk \frac{\varepsilon^2 + \eta^2}{2d_0}\right) \exp\left(jk \frac{\varepsilon'^2 + \eta'^2}{2d_0}\right) d\varepsilon d\eta. \end{aligned} \quad (3)$$

经过透镜相位调制后的复振幅分布为

$$E'(\varepsilon', \eta', \lambda) = E(\varepsilon', \eta', \lambda) \exp\left[-\frac{jk}{2f}(\varepsilon'^2 + \eta'^2)\right], \quad (4)$$

式中, f 为透镜焦距; 指数项是透镜的相位调制函数^[6].

通过透镜后的光波再次经过衍射过程照射到成像屏上, 其积分复振幅分布为

$$\begin{aligned} E(x, y, \lambda) &= \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} E'(\varepsilon', \eta', \lambda) \frac{\exp(jkq)}{q} \\ &\quad \times \exp\left(-jk \frac{\varepsilon' x + \eta' y}{q}\right) \\ &\quad \times \exp\left(jk \frac{\varepsilon'^2 + \eta'^2}{2q}\right) \exp\left(jk \frac{x^2 + y^2}{2q}\right) d\varepsilon' d\eta'. \end{aligned} \quad (5)$$

经过变量代换后 (5) 式可简化为

$$\begin{aligned} E(x, y, \lambda) &= A(\lambda) \exp\left\{jk \frac{(f - d_0)(x^2 + y^2)}{2(f - d_0)q + fd_0}\right\} \\ &\quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \kappa(\varepsilon, \eta) \exp\left(-jk \frac{f(\varepsilon x + \eta y)}{q(f - d_0) + fd_0}\right) d\varepsilon d\eta, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $A(\lambda)$ 是以 λ 为参数的函数, 其只对 $E(x, y, \lambda)$ 的幅值起作用而不会影响 $E(x, y, \lambda)$ 在 (x, y) 方向上的分布形状.

分析 (6) 式可发现, 衍射屏上的 $E(x, y, \lambda)$ 等于栅网振幅透过调制函数 $\kappa(\varepsilon, \eta)$ 的傅里叶变换与一个二次相位因子的乘积.

对于通常的望远型成像, 物距 p 往往数十倍于焦距 ($p \gg f$), 因此 $q \approx f$, 定义 f_ε, f_η 分别为

$$\begin{aligned} f_\varepsilon &= \frac{fx}{\lambda[(f - d_0)q + fd_0]} = \frac{x}{\lambda f}, \\ f_\eta &= \frac{fy}{\lambda[(f - d_0)q + fd_0]} = \frac{y}{\lambda f}. \end{aligned} \quad (7)$$

代入 (6) 式, 得

$$\begin{aligned} E(x, y, \lambda) &= A(\lambda) \iint_{-\infty}^{\infty} \kappa(\varepsilon, \eta) \\ &\quad \times \exp[-j2\pi(f_\varepsilon \varepsilon + f_\eta \eta)] d\varepsilon d\eta \\ &= A(\lambda) \mathcal{F}(f_\varepsilon, f_\eta), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathcal{F}(f_\varepsilon, f_\eta)$ 是 $\kappa(\varepsilon, \eta)$ 的傅里叶变换.

2.2. 栅网结构的数学描述

如果栅网结构参数如图 3, 网孔大小 $a \times b$; 网孔间距为 $d_1 \times d_2$; 栅网的网孔数量为 $n_1 \times n_2$, 则栅网结构的栅网振幅透过调制函数^[7,8]为

$$\begin{aligned} \kappa(\varepsilon, \eta) &= \left[\text{rect}\left(\frac{\varepsilon}{a}, \frac{\eta}{b}\right) * \text{comb}\left(\frac{\varepsilon}{d_1}, \frac{\eta}{d_2}\right) \right] \\ &\quad * \text{rect}\left(\frac{\varepsilon}{n_1 d_1}, \frac{\eta}{n_2 d_2}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $*$ 表示卷积运算.

对 (9) 式进行傅里叶变换, 得到

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(f_\varepsilon, f_\eta) &= \sin(f_\varepsilon a f_\eta b f_\eta) \text{comlf}(d_1 f_\varepsilon, d_2 f_\eta) \\ &\quad * \sin(n_1 d_1 f_\varepsilon, n_2 d_2 f_\eta) \\ &= \sin(f_\varepsilon a f_\eta) \text{comlf}(d_1 f_\varepsilon) * \sin(n_1 d_1 f_\varepsilon) \\ &\quad * \sin(f_\eta b f_\eta) \text{comlf}(d_2 f_\eta) * \sin(n_2 d_2 f_\eta). \end{aligned} \quad (10)$$

因为 (f_ε, f_η) 是空间频率坐标, 不能真实反映空间坐标, 故用空间坐标来代替, 即将 (7) 式代入到 (10) 式,

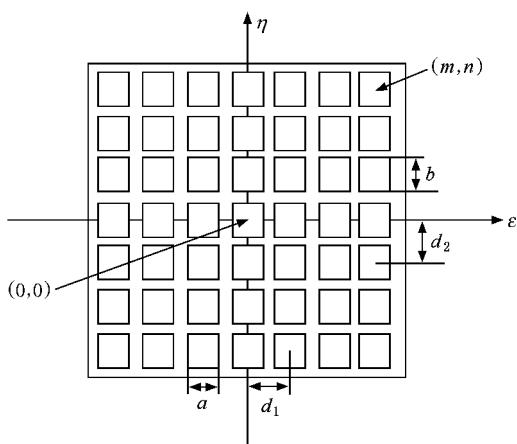


图 3 棚网结构图

$$\mathcal{I}(x, y, \lambda) = \text{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda f}\right) \text{comb}\left(\frac{d_1 x}{\lambda f}\right) * \text{sinc}\left(\frac{n_1 d_1 x}{\lambda f}\right) \\ * \text{sinc}\left(\frac{by}{\lambda f}\right) \text{comb}\left(\frac{d_2 y}{\lambda f}\right) * \text{sinc}\left(\frac{n_2 d_2 y}{\lambda f}\right). \quad (11)$$

衍射屏上的光强分布是复振幅分布在时间上的平均 $\mathcal{I}(x, y) = \langle E \cdot E^* \rangle = |E|^2$, 所以单色点光源照射棚网结构的光强分布(强度点扩散函数)为

$$\mathcal{I}(x, y, \lambda) \\ = C^2(\lambda) |\mathcal{I}(x, y, \lambda)|^2 \\ = C^2(\lambda) \text{sinc}^2\left(\frac{ax}{\lambda f}\right) \left| \text{comb}\left(\frac{d_1 x}{\lambda f}\right) * \text{sinc}\left(\frac{n_1 d_1 x}{\lambda f}\right) \right|^2 \\ * \text{sinc}^2\left(\frac{by}{\lambda f}\right) \left| \text{comb}\left(\frac{d_2 y}{\lambda f}\right) * \text{sinc}\left(\frac{n_2 d_2 y}{\lambda f}\right) \right|^2. \quad (12)$$

2.3. $C^2(\lambda)$ 数值的选取

对于理想的单色点光源照明情况, $C^2(\lambda)$ 对 $\mathcal{I}(x, y, \lambda)$ 的光强分布不产生影响, 只是对光强整体乘了一个常数而已. 但对于实际的红外热成像情况而言, 一定光谱范围内不同温度 T 的物体辐射能量是不同的, 因此, 对于实际红外成像需要考虑光谱辐射出射度因素.

按定义 $C^2(\lambda)$ 正比于目标单色光 λ 的辐射能量, 对于黑体目标, 其物理意义相当于黑体光谱辐射出射度. 因此, 本文 $C^2(\lambda)$ 由黑体光谱辐射出射度来确定^[9]

$$C^2(\lambda) \propto M_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (13)$$

式中, $M_0(\lambda, T)$ 为黑体辐射出射度(图 4), 即普朗

克公式, 第一辐射常数 $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$; 第二辐射常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} (\text{m} \cdot \text{K})$; h 为普朗克常数 ($\text{W} \cdot \text{s}^2$); k 为玻尔兹曼常数 ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$); c 为光速 (m/s); λ 为波长 (m); T 为温度 (K).

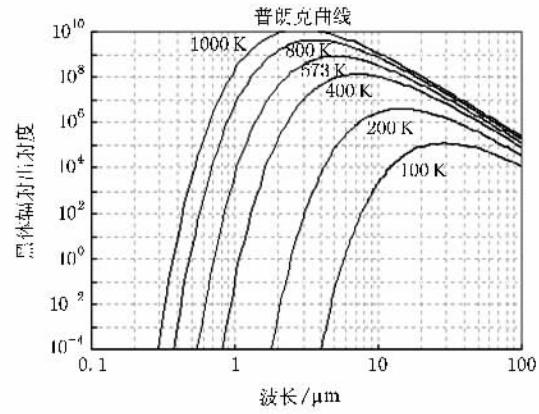


图 4 黑体光谱辐射出射度

2.4. 非单色点辐射及热成像靶面的信号

由于不同波长之间的辐射无干涉作用, 所以非单色辐射源的整体效果等于不同波长 λ 的辐照度的叠加. 因此, 对于一定温度 T 的目标, 将 $M_0(\lambda, T)$ 代替 $C^2(\lambda)$ 代入(12)式, 并进行波长积分, 即可得到衍射屏上的目标辐射强度分布

$$\mathcal{I}(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{I}(x, y, \lambda) d\lambda \\ = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda, T) |\mathcal{I}(x, y, \lambda)|^2 d\lambda, \quad (14)$$

式中 (λ_1, λ_2) 为探测器响应波段.

红外热像仪的成像面是探测器阵列, 由于探测器响应存在波长选择性, 故热像仪靶面的信号电荷密度 $I_e(x, y)$ 分布为

$$I_e(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \mathcal{I}(x, y, \lambda) d\lambda \\ = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) C^2(\lambda) |\mathcal{I}(x, y, \lambda)|^2 d\lambda \quad (15)$$

式中, $S(\lambda)$ 为光谱响应.

(15)式是连续函数, 为适应离散探测器阵列采样和后续数字图像处理, 需要进一步对强度点扩散函数进行离散化处理. 灰度数字图像的离散处理过程可描述为

$$I(m, n) = \mathcal{I}(x, y) * \text{rect}\left(\frac{x}{a_m}, \frac{y}{b_n}\right) \text{comb}\left(\frac{x}{d_m}, \frac{y}{d_n}\right), \quad (16)$$

其中 (m, n) 表示离散图像像素点坐标 (x, y) 表示像面上的连续坐标; a_m, b_n 是探测器像元尺寸; d_m, d_n 是探测器的像元间距.

3. 成像模拟与系统实验

3.1. 成像过程中的物像关系

对于线性空间不变光电成像系统, 由于光电成像系统的传递特性与栅网系统引起的衍射效应是互不相关的, 因此, 如果不考虑成像空间的缩放, 带有栅网的热成像系统的成像过程可表为

$$\begin{aligned} P(x, y) &= S(x, y) * [h(x, y) * h_1(x, y)] \\ &= [S(x, y) * h(x, y)] * h_1(x, y), \quad (17) \end{aligned}$$

式中, $S(x, y)$ 为物方辐射图像分布; $P(x, y)$ 为像方辐射图像分布; $h(x, y)$ 为热成像系统的点扩散函数; $h_1(x, y)$ 为栅网结构衍射的点扩散函数, 即为 (15) 式所给出的点辐射源的衍射强度分布.

(17) 式表明, 可通过理想的物体像与系统点扩散函数的卷积得到实际成像面上的图像; 且可通过将目标场景加/不加前置栅网的两次成像图像, 不加前置栅网的图像作为理想图像, 将本文栅网模型作用于该图像, 得到模拟的退化图像, 再与加栅网的实际图像进行对比, 从而验证模型的正确性.

不失一般性, 本文分析中假设 $S(\lambda) \equiv 1$, 即探测器输出的信号电荷密度分布与靶面上的辐射强度分布一致.

3.2. 点扩散函数的模拟仿真及其图像处理

采用法国 Jade 中波焦平面热像仪(如图 5)在不加/加栅网条件下分别对可控温腔式黑体(图 6)进行成像, 得到图 7 和图 8 的目标场景图像. 实验中的各实验设备主要参数如表 1 所示.

将表 1 参数代入(14)式, 通过数值模拟仿真得到的点扩散函数如图 9. 将点扩散图像 9 与图 7 进行卷积处理, 得到模拟的栅网衍射退化图像如图



图 5 实验用的中波热像仪

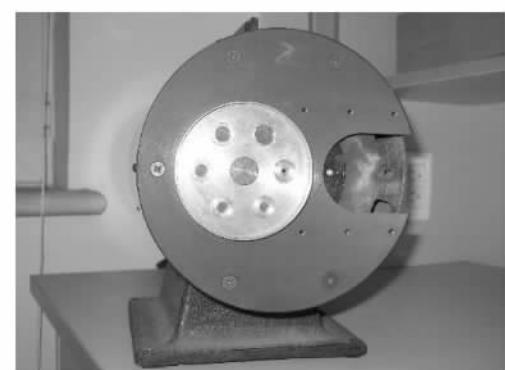


图 6 实验用腔式黑体

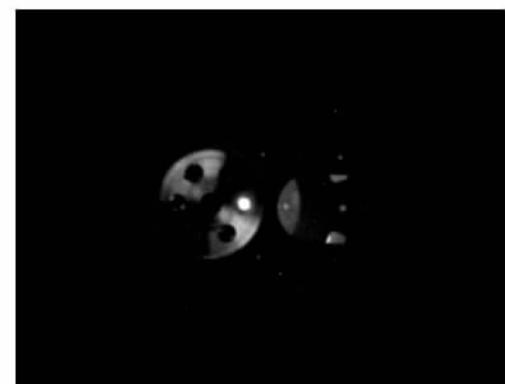


图 7 无前置栅网的红外实验图像

表 1 实验设备的主要参数

栅网结构参数	中波热像仪技术参数
网孔大小($a \times b$) mm \times mm	焦距 f /mm
网格间距($d_1 \times d_2$) mm \times mm	响应波长 $\lambda/\mu\text{m}$
目标参数(室温 20°C)	像元大小($a_m \times b_n$) $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$
黑体温度/K (300)	像元间距($d_m \times d_n$) $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$

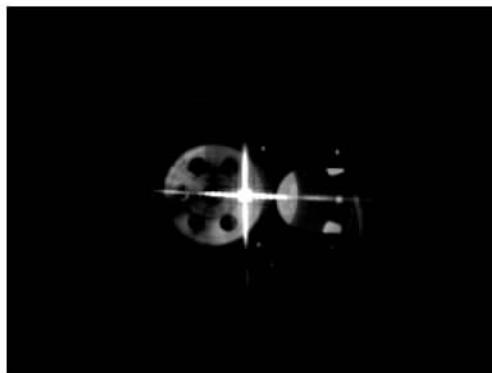


图8 加前置栅网的实验图像

10. 与加前置栅网的实验图像8对比,可明显看到两幅图像取得了一致性的特征——十字形衍射特征在两幅图当中均较清晰地显现出来。

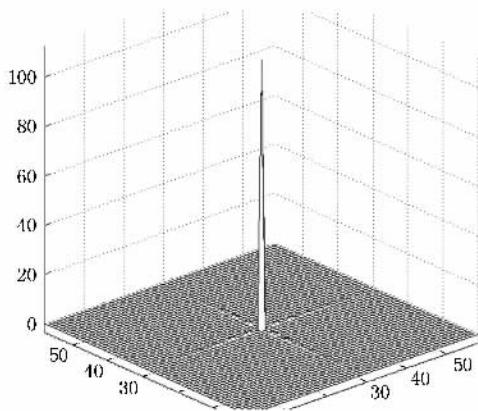


图9 离散化点扩散函数的作图

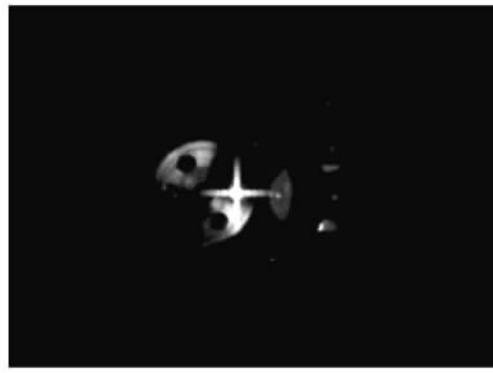


图10 通过点扩散函数处理后的图像

本文建立的模型不仅可应用在单目标情况下,对于温度差别不大的多目标情况同样也适用。但对于温度差别很大的多目标或背景温度特别复杂的情况,则需要对模型进行修改,对不同温度的目标分别建立各自温度所对应的 $\lambda-M_0$ 模型,再进行融合进而得出最终结果。

4. 结 论

本文以经典的波动光学基本理论为基础,结合实际热成像系统应用出现的异常情况,对热成像系统前置栅网成像出现的衍射现象建立了数学模型。通过对实验图像与数字模拟图像的比较表明:本文建立的模型可较好地描述前置栅网热成像出现的衍射现象,并为进一步减小/消除这种虚假图像奠定了理论基础。

- [1] Max B, Emil W 2001 *Principles of Optics* (Cambridge University Press)
- [2] Xie J H, Zhao D Z, Yan J X 2005 *Wuli Guangxue Jiaocheng* (Beijing Institute of Technology Press) [in Chinese] 谢敬辉、赵达尊、闫吉祥 2005 物理光学教程(北京:北京理工大学出版社)
- [3] Zhong X H 2005 *Modern Fundamentals of Optics* (Beijing :Peking University Press) [in Chinese] 钟锡华 2005 现代光学基础(北京:北京大学出版社)
- [4] Cifuentes A, Arasa J, Pizarro C 2006 *SPIE-OSA* **6342**
- [5] Zhu C G, Xue M Q, Liu D S, Gao Y J 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 394

(in Chinese) [朱传贵、薛鸣球、刘德森、高应俊 1993 物理学报 **42** 394]

- [6] Cao G R 2003 *Applied Laser* **23** 157 (in Chinese) [曹国荣 2003 应用激光 **23** 157]
- [7] Zheng Z M, Ding T H, Zhang J F 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 294 (in Chinese) [郑志敏、丁天怀、张建福 2006 光学学报 **26** 294]
- [8] Hwang H E, Yang G H 2002 *Optical Engineering* **41** 2620
- [9] Bai T Z, Jin W Q 2006 *Guandian Chengxiang Yuanli Yu Jishu* (Beijing :Beijing Institute of Technology Press) [in Chinese] 白廷柱、金伟其 2006 光电成像原理与技术(北京:北京理工大学出版社)

The diffraction effect in a thermal imaging system with a front wire grid^{*}

Liu Bin[†] Jin Wei-Qi Dong Li-Quan

(Dept of Optical Engineering, School of Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 28 December 2007; revised manuscript received 27 February 2008)

Abstract

According to the affected images generated by the thermal imaging system which incorporates a front wire grid, with the help of classical optical theory, we analyzed the diffractive functional principle character of light wave, and also analyzed the case of non-concolorous targets, and further established the mathematic model. The results indicated that after putting in parameters of real instance and generating simulated images using MATLAB, the simulated images have good comparability with the images obtained in reality. The research achieved the expected aim of the modelling. Finally we put forward the questions and key technology pending further research.

Keywords : thermal imaging, diffraction, Fourier transform, wire grid

PACC : 4230, 4225F, 4280Q, 0762

* Project supported by PLA General Armament Department Advance Research Program in the National "11th 5-year Plan" (Grant No. 40405050103).

† E-mail: freeman@bit.edu.cn