

〈系统与设计〉

红外成像系统综合性能评价方法研究

王连振<sup>1,2</sup>, 吴晗平<sup>1,2</sup>, 李旭辉<sup>1,2</sup>, 李军雨<sup>1,2</sup>, 王华泽<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 红外成像系统性能评价是红外成像系统总体技术的重要组成部分。在对红外成像系统各单项性能评价模型分析比较的基础上, 对国内外几种典型的红外成像系统综合性能评价模型进行了比较研究, 并重点对传统和修正的点源、面源红外成像系统作用距离方程进行了相关探讨, 这为红外成像系统的性能评价提供了可靠的理论基础。

**关键词:** 红外成像系统; 综合性能评价; 作用距离

**中图分类号:** TN216      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2015)01-0057-06

Research on the Methods of IR Imaging System  
Comprehensive Performance Evaluation

WANG Lian-zhen<sup>1,2</sup>, WU Han-ping<sup>1,2</sup>, LI Xu-hui<sup>1,2</sup>, LI Jun-yu<sup>1,2</sup>, WANG Hua-ze<sup>2</sup>

(1. Xiangtan University School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan Hunan 411105, China;

2. Institute of Optoelectronic System and Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Infrared imaging system performance evaluation is an important part of the overall technology of infrared imaging system. On the basis of analysis and comparison of each individual infrared imaging system performance model, the paper comparatively researches the comprehensive performance evaluation of several typical models at home or abroad, and mainly discusses the effects of traditional and modified point source, non-point source operating-range equations of infrared imaging system, which would provide reliable theoretical basis for infrared imaging system performance evaluation with certain practical guiding significance for the design of infrared imaging system.

**Key words:** infrared imaging system, comprehensive performance evaluation, operating range

0 引言

随着红外成像技术的不断提高, 红外成像系统已从采用单元探测器加二维光机扫描、多元线阵探测器加一维光机扫描, 发展到无需光机扫描的“凝视”型红外成像系统, 并广泛应用于空间防御、火控、昼夜观察、成像制导等领域<sup>[1]</sup>。如何将红外成像系统所涉及的各种技术匹配设计以获取最优性能, 始终是红外成像系统发展历程中所要解决的关键问题, 而解决此问题就必须对其各组成模块进行建模仿真, 由此来对系统的性能进行预测, 即对红外成像系统进行性能评价<sup>[2-3]</sup>。

1 红外成像系统性能评价及其分类

红外成像系统性能评价是红外成像总体技术的重要组成部分, 指的是在目标、背景和环境特征复杂多变的条件下, 采用模拟或实验的方法对红外成像系统各性能参数进行有效的评估, 进而为实际系统的论证、设计、测试和验收提供可靠的技术支持。一般来说, 评价红外成像系统性能的方法主要有三种: 试验测试法、半实物仿真法、性能理论模型法<sup>[3]</sup>。试验测试法难以在复杂多变的环境下进行, 使得系统性能评估受到很大限制, 而半实物仿真法由于需要昂贵的红外场景投影系统, 且系统的响应范围受到限制, 因此, 对于红外成像系统的性能评价通常采用性能理论模

收稿日期: 2014-09-28; 修订日期: 2014-11-11.  
作者简介: 王连振 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外成像系统总体技术。E-mail: 535217024@qq.com.  
通讯作者: 吴晗平 (1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。E-mail: wuhanping601@sina.com.

型法。

红外系统的基本技术参数主要有<sup>[4-6]</sup>：光学系统的有效通光孔径  $D_0$  和焦距  $f_0$ ，它们是决定红外成像系统性能和体积的关键参数；瞬时视场角  $\alpha$ 、 $\beta$ ，它们反映红外成像系统空间分辨率的高低；此外，还有观察视场角  $W_H$ 、 $W_V$ ，帧时  $T_f$  和帧速  $F$ ，扫描效率  $\eta$ （扫描系统）、探测灵敏度、滞留时间  $\tau_d$ ，等。作为军用系统使用的技术性能参数往往有：探测概率、识别概率、作用距离、可靠性、维修性、电磁兼容性、环境适应性，等。

红外成像系统的各性能评价模型是在以上各基本技术参数的基础上进一步综合分析得出的。通常可将各性能评价模型分为单项性能评价模型和综合性能评价模型。除了上面提到的单项技术参数可以作为系统的单项性能评价外，往往把最小可分辨温差（MRTD）、最小可探测温差（MDTD）、噪声等效温差（NETD）、调制传递函数（MTF）等，从另外角度作为单项性能评价模型。综合性能评价模型主要有美国的 1975NVL 模型、FLIR92 性能模型、NVTherm 模型、荷兰的 TOD 性能评价模型以及德国的 MTDP/TRM3 性能评价模型等。此外，作为众多科研工作者研究热点的作用距离一般既可作为单项性能评价模型，也可作为综合性能评价模型。

2 红外成像系统单项性能评价模型

红外成像系统单项性能评价模型多用于描述其

对静态目标的成像性能<sup>[7]</sup>，这里主要指：MRTD、MDTD、NETD 和 MTF 等。这些参数间相互影响和制约。因此，对各单项性能评价模型进行各指标优缺点对比分析将对红外成像系统综合评价模型的发展起到导向性作用。表 1 给出了红外成像系统各单项性能评价模型的对比<sup>[8-12]</sup>。

3 红外成像系统综合性能评价

3.1 国外综合性能评价

国外对红外成像系统性能评价方法研究起步较早。第一套完整用于评价红外成像系统的性能模型是 1975 年由美国陆军夜视实验室提出的，于 1979 年经过不断修改和完善后，成为红外成像系统性能模型评价及研究的基础。随着二代焦平面成像技术的应用，由于该模型单考虑了时间随机噪声，未包含采样效应，因此，无法有效对空间频率较低或较高目标进行预测。为了突破这一局限性，又发展了主要用于第二代热成像系统的 FLIR92 性能模型<sup>[13-17]</sup>，该模型采用了二维 MRTD，推导了 MRTD 的新方程，引入了三维噪声模型，提出了三维噪声因子的定义及用于 MRTD、MDTD 预测时的噪声修正函数等新概念。随着新一代的红外成像技术的应用，经典 MRTD 对新一代红外成像系统的性能不能给予较好的预测，因此，国际上提出了 3 种用于替代的性能评价模型。分别为美国的 NVTherm 模型、荷兰的 TOD 性能评价模型以及德国的 MTDP/TRM3 性能评价模型。

表 1 红外成像系统单项性能评价模型对比

Table 1 Comparison of individual IR imaging system performance models

模型名称	主要用途	参数类型	优点	缺点
MRTD	评价系统综合性能	主观评价参数	既反映了成像系统、显示设备的客观性能，又反映了人的主观因素	受目标空间频率和背景辐射特性影响较大，需要大量实验数据对其修正；对人眼的观察效果不能给予真实反映；对红外成像系统非线性因素不能较好的表征；受人主观因素影响较大
MDTD	评价目标可探测性	主观评价参数	反映了系统热灵敏度特性及空间分辨力；是目标尺寸函数，可有效估算点源目标可探测性；测试装置和方法简单；使用方便	空间频率趋向截止频率时，MDTD 保持有限
NETD	评价探测器灵敏度	客观评价参数	描述了系统大面积温度灵敏度性能；从理论上可以模型化、可以预测，对系统设计有帮助；测试装置和测试方法简单，使用方便	只反映光学系统、探测器及一小部分电路特性，没有考虑从测量点到显示之间的噪声源或滤波作用；测量的是单帧信噪比；采用电滤波器限制噪声，使得高频响应下降
MTF	评价系统空间分辨率	客观评价参数	可以衡量红外成像系统如实再现场景的程度；包含了红外成像系统各个部分	MTF 是以线性系统为理论支撑，实际系统不可能是完全的线性系统

3.1.1 美国的 NVTherm 模型

NVTherm 模型是美国陆军通讯电子指挥部夜视光电中心主要在建立新的人眼模型和压缩 MTF 两方面对 FLIR92 模型进行改进得来<sup>[18-20]</sup>。压缩 MTF 的理论模型是 Vollmerhausen 于 1999 年提出的，欠采样致使目标获取性能下降，导致空域中系统模糊效果增加，而在频域中主要反映在对 MTF 的压缩或挤压。因此，可以利用压缩因子来反映伪响应给系统带来的性能下降程度，该因子的大小取决于虚假信号、失真和混叠的程度等。定义离散采样系统的响应函数为：

$$\begin{aligned} \text{OTF}_{\text{sys}}(f_x) = & \text{MTF}_{\text{post}}(f_x) \text{MTF}_{\text{pre}}(f_x) + \\ & \text{MTF}_{\text{post}}(f_x) \sum_{n \neq 0} \text{MTF}_{\text{pre}}(nf_s \pm f_x) \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $f_x$  为水平方向空间频率； $\text{MTF}_{\text{post}}$  为采样后的调制传递函数； $\text{MTF}_{\text{pre}}$  为采样前的调制传递函数。定义反映虚假信号与基带信号混淆程度的参数为：

$$\text{SR} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \text{MTF}_{\text{post}}(f_x) \sum_{n \neq 0} \text{MTF}_{\text{pre}}(nf_s \pm f_x) df}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{MTF}_{\text{post}}(f_x) \text{MTF}_{\text{pre}}(f_x) df} \quad (2)$$

在进行实际目标探测、识别和辨认过程中，将采样成像系统对目标识别和辨别作为虚假响应的函数，在目标获取时，压缩取决于鉴别等级。对于识别，二维压缩因子为：

$$f_{2\text{D-recognition}} = \sqrt{(1 - 0.32\text{SR}_x)(1 - 0.32\text{SR}_y)} f_x f_y \quad (3)$$

式中： $\text{SR}_x$  为水平方向的虚假响应系数； $\text{SR}_y$  为垂直方向的虚假响应系数。

NVTherm 模型能够预测高于 Nyquist 频率的 MRTD 值，引入的视觉模型考虑了背景亮度以及人眼视觉物理效应，相比于 FLIR92 模型能够给出更好的目标获取性能。

3.1.2 荷兰的 TOD 评价模型

TOD 评价模型是由荷兰 Human Factors 提出的一种表征红外成像系统性能的三角方向辨别阈值法<sup>[21]</sup>。

表 2 NVTherm/TOD/TRM3 三种评价模型不同探测器各对比度区域性能预测结果对比

Table 2 Comparison between the NVTherm, TOD and TRM3 on different sensors

		NVTherm	TOD	TRM3
低对比度区域		预测结果与 TOD 模型和 TRM3 模型偏离较大	预测结果与 TRM3 模型非常一致	预测结果与 TOD 模型一致
高度欠采样探测器	中对比度区域	预测结果与 TRM3 模型非常相似	-	预测结果与 NVTherm 模型一致
	高对比度区域	-	预测结果与 NVTherm 模型和 TRM3 模型差别较大很大	-
典型欠采样探测器	中对比度区域	预测结果有了些许改进，性能提高了近 10%	预测结果有了非常大的改进	预测结果变差，性能降低了近 20%
	高对比度区域		性能提高了近 70%	

该评价模型是利用如图 1 所示的三角形测试靶，通过调节三角形靶标的大小和对比度，然后由人眼观察采用四选一的测量过程来鉴别所给靶标的方向，由此得到与 MRTD 相类似的三角形尺寸大小与阈值对比度的二维曲线，并由此来预测目标的现场获取性能，比 MRTD 法所有的条形靶预测效果更好。



图 1 TOD 法中 4 个不同方向（上、下、左、右）的三角形样条

Fig.1 Four direction triangle(up、down、left、right)

TOD 法以三角形靶标作为测试样条、更明确的定义了观察者任务，具有较强的理论优点，而且该方法测量过程简单，对于实验测量过程较其他模型具有明显的优势，适合于扫描型、凝视型红外成像系统性能的预测，能够更好的对外场目标的获取性能进行预测。

3.1.3 德国的 MTDP/TRM3 性能模型

考虑到经典的 MRTD 预测曲线限制在 Nyquist 频率以内，德国的 Wittenstein 于 1999 年提出了用于评价欠采样红外成像系统的 MTDP 方法，并将其用于热范围模型（TRM3）中。

MTDP/TRM3 性能评价模型是 MRTD 性能评价模型的扩展。TRM3 主要用于预测红外成像系统的作用距离，基于 MTDP 与 Johnson 准则，对红外成像系统各任务性能进行预测。它是在基于 4 杆靶的基础来测量的，但是对 NVTerm 的测试细节做了改进，可以对采样阵列系统的 4 杆靶图案相位进行优化，在对于欠采样系统的测量，靶标条数的选取可能是 2 条也可能是 3 条<sup>[18,22]</sup>。

针对 NVTherm/TOD/TRM33 种评价模型，表 2 给出了这 3 种评价模型针对不同探测器在不同对比度区域的性能预测结果对比<sup>[23]</sup>。

3.2 国内综合性能评价

随着我国红外成像技术的发展,对红外成像系统性能评价模型的研究也得到相应的进展。国内多家部门,如航天和航空工业集团、兵器集团和试验基地对多种武器系统的半实物仿真系统开展了广泛研究,建立了相应的仿真实验室。系统性能评估方面,进行了计算系统的作用距离,基本性能指标和系统的目标捕获概率以及相关方面的研究。但是这些性能模型仅针对成像系统的静态成像特性进行评价,而无法准确描述成像系统的动态成像特性及性能。总体上,国内在红外成像系统的性能评价方面的研究缺乏系统性<sup>[24]</sup>。

近年来,金伟其等人较系统地研究热成像系统的静态性能模型,吸收了美国 1979 年模型和英国 SPRITE 模型,并加以研究改进,建立了一代通用组件红外成像系统的静态性能评价模型及模拟软件,可对红外成像系统的各静态性能模型和作用距离进行计算与预测。系统的完整性及工程化得到提升,该系统已应用于工程实际<sup>[18,25]</sup>。杨应槐提出了基于系统品质因子  $M$  的综合性能评价模型,利用系统品质因子  $M$  大小,可客观、定量地评估各种不同红外系统性能的优劣,此后,吴晗平在其基础上对该品质因子进行了进一步的改进,将探测概率与虚警率等要素综合考虑到新的性能评价模型中,得出了更加全面的综合性能评价模型<sup>[2,26]</sup>。

4 红外成像系统作用距离

作用距离一直以来都是作为红外成像系统性能评价模型中最重要的项目之一,既可作为单项性能评价指标,也可作为综合性能评价指标,一直以来都是众科研工作者研究的重点,它不仅与内部的参数有关,而且受到外部条件制约。在对红外成像系统作用距离的研究中,许多科研工作者也取得了一些成果,总结与推导出了相应的作用距离预测方程。

4.1 传统红外系统作用距离方程及其修正

4.1.1 传统红外系统作用距离方程

由 Hudson 给出的传统的红外系统作用距离方程<sup>[5]</sup>:

$$R=\left[\frac{\pi\cdot D_0\left(\text{NA}\right)\cdot D^{\star}\cdot\tau_0\cdot\tau_a\cdot I_t}{2\left(\omega\cdot\Delta f\right)^{1/2}\cdot\text{SNR}}\right]^{1/2}\tag{4}$$

式中:  $\text{NA}$  为系统的数值孔径;  $I_t$  为目标辐射强度;  $\omega$  为红外系统的瞬时立体视角。

该方程主要有三点不足:第一,该方程未考虑弥散效应对点源作用距离的影响;第二,未考虑探测率温度特性的影响;第三,未考虑背景辐射效应的影响,存在一定的局限性。虽然该方程存在一定的局限性,

但却为早期红外系统作用距离的预测提供了重要的理论参考。

4.1.2 修正后的红外系统作用距离方程

文献[4]中对传统作用距离方程做了修正,得出了基于探测率温度特性与背景影响的红外系统作用距离方程:

$$R^2=\frac{\pi D_0\tau_0\tau_a}{4F\left(\omega\cdot\Delta f\right)^{1/2}\cdot\text{SNR}}\left\{D_{\Delta\lambda}^{\star}\left(T_t\right)\cdot J_t-D_{\Delta\lambda}^{\star}\left(T_b\right)\cdot J_b\right\}\tag{5}$$

式中:  $D_{\Delta\lambda}^{\star}$  为波段探测率;  $T_t$ 、 $T_b$  分别为目标、背景温度;  $J_t$  为目标光谱辐射强度;  $J_b$  为背景光谱辐射强度。

该方程在考虑探测率温度特性和背景的影响的情况下,对传统的红外点目标作用距离方程进行了修正。从探测率的理论基础出发,引入波段探测率修正因子,并重新对红外系统作用距离方程进行了推导。

4.2 其他变形的红外成像系统作用距离方程

红外成像系统作用距离方程是在红外系统作用距离方程的基础上进一步改进得到的,对于红外成像系统作用距离通常分为点源目标作用距离和面源目标作用距离两种情况。

4.2.1 红外成像系统点源作用距离方程

红外成像系统点源目标作用距离在大部分文献中都给出了相应的推导过程,常见的有如下几种。

1) 文献[1]中提出的 NETD 法作用距离方程:

$$2\ln R+\mu R=\ln\frac{\Delta TS}{\text{SNR}_{\text{DT}}\cdot\alpha\beta\text{NETD}}\tag{6}$$

式中:  $\mu$  为大气消光系数;  $\Delta T$  为目标与背景温差;  $S$  为目标投影面积。由上式可知,消光系数的减小对提高作用距离有利,  $\mu$  值也是波长和作用距离的函数。此外,该方程比较简单,适合点目标作用距离手工计算,但是其未考虑传递函数的影响<sup>[27-30]</sup>。

2) 文献[31]中提出的考虑弥散效应的作用距离方程:

$$R=f\sqrt{\frac{M_t\tau_a\tau_0}{2\left(M_0+\pi\tau_0L_b\right)}\left(\frac{A_s}{A_m}\right)\left(\frac{1-C_M}{C_M}\right)}\tag{7}$$

式中:  $M_t$  为目标的辐射出射度;  $L_b$  为自然背景亮度;  $A_s$  为目标的有效辐射面积;  $A_m$  为弥散斑面积;  $C_M$  为调制对比度。该方程结合了工程实际要求,综合考虑了背景辐射和点目标成像弥散效应影响,特别适用于红外焦平面成像系统作用距离预测,但是该公式对于非水平观测条件不能很好的给出作用距离的预测。

3) 文献[32]中提出的考虑背景起伏特性的作用距

离方程：

$$R = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\beta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{t,\lambda} d\lambda}{(1 + k \cdot \text{SNR}_{\min}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{b,\lambda} d\lambda}$$

(8)

式中： $k$  为背景起伏系数。该方程全面考虑了目标与背景对比度及红外图像空间起伏噪声特性，对于影响红外成像系统作用距离的噪声来源做了深入分析，特别适用于凝视成像探测系统作用距离预测。

4.2.2 红外成像系统面源作用距离方程

对于面源目标作用距离的预测主要以系统的 MRTD 为依据，综合考虑目标与外场环境实际情况以及观察等级和探测概率，从而计算出各不同情况下的面源作用距离，文献[33]中给出了该方法的详细介绍，其作用距离计算方程为：

$$\Delta T = \Delta T_0 \tau_a(R) = \text{MRTD}(f_T)$$

(9)

式中： $\Delta T_0$  为目标与背景的初始温差； $\tau_a(R)$  为距离  $R$  上的平均大气透射比； $f_T$  为极限空间频率。对其进行进一步推导可得：

$$R = \frac{H}{n_c} f_T$$

(10)

式中： $H$  为目标的临界尺寸； $n_c$  为约翰逊半周期数。

该方法对于信噪比的选取与点源目标作用距离信噪比的选取不同，它是与人眼视觉判读相关的阈值显示信噪比，根据不同的观察等级和探测概率取值，文献[14]中给出了相应的对照表。其中系统的 MRTD 是关于空间频率的函数，对于确定的红外成像系统，其结构参数是已知的。而对于 MRTD 值，在实验室针对标准图案可测量。通过查询文献[14]中所给出的性能与可分辨周期数的关系表，将数据代入式(10)中即可快速估算出不同探测概率以及不同探测等级下的面源目标作用距离。考虑到野外环境及目标尺寸与标准测量时所产生的误差，文献[1]给出了对目标外形尺寸以及野外环境目标温度修正因子，使得该方法对面源目标作用距离的估算更加精确。

5 结束语

红外成像系统综合性能评价方法的研究对红外成像总体技术的发展有着十分重要的作用。国外对该技术的研究起步较早，研究成果较国内先进。未来红外成像系统综合性能评价方法主要围绕单项性能评价与综合性能评价有机结合、静态性能评价和动态性能评价有效互补、理论模型法和实物仿真法综合运用等方面展开。这将对红外成像总体技术的发展提供可

靠的理论基础和有力的技术支持。

参考文献：

[1] 安成斌, 张煦宁, 陈盈, 等. 红外成像系统作用距离计算[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 716-719.

[2] 吴晗平. 红外搜索系统的作用距离与综合性能评价[J]. 应用光学, 1995, 16(2): 23-28.

[3] 张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.

[4] 吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[5] Richard D Hudson, Jr. *Infrared System Engineering*[M]. John Wiley&Sons, Inc., 1969.

[6] Fan Xinying, Gu Feng, Guo Fei. Development of Thermal Infrared Imaging System[C]//*Pro. Of SPIE , International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013 : Low-Light-Level Technology and Applications*, 2013, 8912: 1-7.

[7] 金伟其. 热成像系统静态性能模型研究的进展[J]. 电子学报, 1995, 23(10): 179-182.

[8] 范心田, 卢振武, 孙强. 红外成像系统中 MRTD 测试方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 445-448.

[9] 杨迪, 王雅萍, 曾嫦娥, 等. 欠采样系统的 MRTD 测试方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(5): 35-40.

[10] 谢宝蓉, 冯书谊, 方彩婷, 等. 基于数字 TDI 技术的红外成像系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(4): 207-210.

[11] Lloyd J M. *Thermal imaging systems*[M]. New York: Plenum Press, 1975.

[12] Ratches J A, Lowson W R. Night vision laboratory static performance model for thermal viewing systems[D]. U.S.A.E.C.Report, ECOM-7043, 1975.

[13] Scott L, D, Agostino J. NVEOD FLIR92 Thermal Imaging Systems Performance Model[C]//*SPIE*, 1992, 1689: 194-203.

[14] 骆清铭, 刘贤德. 热成像系统作用距离的研究[J]. 激光与红外, 1990, 21(3): 36-39.

[15] Driggers R G, Vollmerhausen R H, O’Kane B L. Sample imaging sensor design using the MTF squeeze model to characterize spurious response [C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing X*, 1999, 3701: 61-73.

[16] Rosel, F A. Video Display, and Perceived Image Signal to Noise Ratios[R]. AD/A-073763, Chapter IV, 1979.

[17] Scott L B, Condiff L R. C2NVEO advanced FLIR systems performance model[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, 1990, 1309: 168-180.

[18] 金伟其, 王吉晖, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新进展[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 7-13.

- [19] DEVITT N, DRIGGERS R G, VOLLMERHAUSEN R. Target recognition performance as a function of sampling[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XII*, 2001, **4372**: 74-85.
- [20] MAURER T, DRIGGERS R G, VOLLMERHAUSEN R. 2002 NVTherm improvements[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared and Passive Millimeter-wave Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, 2002, **4791**: 15-23.
- [21] Bijl P, Valetton J M. TOD. a New Method to Characterize Electro-optical System Performance[C]//*SPIE Proceedings*, 1998, **3377**: 182-193.
- [22] Wittenstein W. Thermal Range Model TRM3[C]//*SPIE Proceedings*, 1998, **3436**: 413-424.
- [23] Bijl P, Hogervorst M A, Valetton J M. TOD. NV Therm and TRM3 Model Calculations: A Comparison[C]//*SPIE Proceedings*, 2002, **4719**: 51-62.
- [24] 石宁宁. 红外成像系统的测试与评价[D]. 长春: 长春理工大学, 2008, 3.
- [25] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [26] 杨应槐. 红外系统性能的判据[J]. 红外与激光技术, 1991, **20**(1): 13-19.
- [27] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 牟达, 韩红霞. 红外系统作用距离方程的比较与分析[J]. 长春理工大学学报, 2012, **35**(4): 5-9.
- [29] 黄静, 刘朝晖, 邓书颖. 点源目标的红外成像系统作用距离分析[J]. 科学技术与工程, 2007, **7**(18): 4587-4590.
- [30] 刘杰, 高雅允. 红外热成像跟踪系统作用距离的评价[J]. 北京理工大学学报, 1998, **18**(1): 64-69.
- [31] 邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(7): 893-896.
- [32] 王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(2): 150-152.
- [33] 李润顺, 袁祥岩, 范志刚, 等. 红外成像系统作用距离估算[J]. 红外与激光工程, 2001, **30**(1): 1-3.

(上接第56页)

- [3] Nishikawa Y, Fujiwara K, Shima T. Qualitative Analysis of Nanogram Samples with Fourier Transform Infrared Transmission Surface Electromagnetic Wave Spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 1990, **44**(4): 691-694.
- [4] Nishikawa Y, Fujiwara K, Shima T. A study on the qualitative and quantitative analysis of nanogram samples by transmission infrared spectroscopy with the use of silver island films[J]. *Applied spectroscopy*, 1991, **45**(5): 747-751.
- [5] Coronado E A, Schatz G C. Surface plasmon broadening for arbitrary shape nanoparticles: A geometrical probability approach[J]. *The Journal of chemical physics*, 2003, **119**(7): 3926-3934.
- [6] Osawa M, Ataka K I, Yoshii K, et al. Surface-enhanced infrared spectroscopy: the origin of the absorption enhancement and band selection rule in the infrared spectra of molecules adsorbed on fine metal particles[J]. *Applied spectroscopy*, 1993, **47**(9): 1497-1502.
- [7] Geng S, Friedrich J, Gähde J, et al. Surface - enhanced infrared absorption (SEIRA) and its use in analysis of plasma - modified surface[J]. *Journal of applied polymer science*, 1999, **71**(8): 1231-1237.
- [8] Miyake H, Ye S, Osawa M. Electroless deposition of gold thin films on silicon for surface-enhanced infrared spectroelectrochemistry[J]. *Electrochemistry Communications*, 2002, **4**(12): 973-977.
- [9] Merklin G T, Griffiths P R. Influence of chemical interactions on the surface-enhanced infrared absorption spectrometry of nitrophenols on copper and silver films[J]. *Langmuir*, 1997, **13**(23): 6159-6163.
- [10] Enders D, Nagao T, Pucci A, et al. Surface-enhanced ATR-IR spectroscopy with interface-grown plasmonic gold-island films near the percolation threshold[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, **13**(11): 4935-4941.
- [11] KINUGASA S, TANBE K, TAMURA T. Spectral database for organic compounds[DB/OL]. [http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre\\_index.cgi?lang=eng](http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre_index.cgi?lang=eng)
- [12] Merklin G T, Griffiths P R. Effect of microscopic surface roughness in surface-enhanced infrared absorption spectrometry[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, **101**(30): 5810-5813.
- [13] Wells M, Dermody D L, Yang H C, et al. Interactions between organized, surface-confined monolayers and vapor-phase probe molecules. 9. Structure/reactivity relationship between three surface-confined isomers of mercaptobenzoic acid and vapor-phase decylamine[J]. *Langmuir*, 1996, **12**(8): 1989-1996.