

文章编号: 1672-8785(2014)10-0027-06

一种最小可分辨温差计算方法

毛 谨

(四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 提出了一种红外成像系统的最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 预测方法。该方法以线性系统理论为基础, 利用调制传递函数建立红外成像系统模型, 模拟生成不同空间频率的标准四杆靶 (长宽比为 7:1); 通过分析四杆靶的二维 (横向和纵向) 成像质量, 引入对比度修正因子, 获取系统输出的四杆靶与背景的温差; 利用阈值输入对比度温差, 得到系统的 MRTD。仿真试验表明, 该方法预测的 MRTD 值与实际测量值一致。

关键词: 红外成像系统; 阈值输入对比度; 最小可分辨温差; 对比度修正因子

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.10.006

A Calculation Method of Minimum Resolvable Temperature Difference

MAO Jin

(Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: A method for predicting the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of an infrared imaging system is proposed. The method is based on the linear system theory. It uses the modulation transfer function to establish an infrared imaging system model for simulating and generating standard four-bar patterns with different spatial frequency (it has an aspect ratio of 7:1). By analyzing the two-dimensional (horizontal and vertical) imaging quality of the four-bar pattern and introducing a contrast correction factor, the temperature difference between the four-bar pattern and the background output from the system is acquired. Then, the threshold input contrast transference is used to obtain the MRTD of the system. The simulation results show that the MRTD predicted by this method is coincident with the actual measurement value.

Key words: infrared imaging system; threshold input contrast transference parameter; minimum resolvable temperature difference; contrast amender coefficient

0 引言

红外成像系统具有全被动式探测、不易被发现和干扰、对雾霾穿透能力强和能透过伪装探测隐蔽目标等能力, 因此被广泛应用于军事和民用领域。其性能的预测和评价显得越来越重要。红外成像系统的性能预测指标一般包括

系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 和 MRTD 等, 其中计算 MRTD 有助于探测器和实际系统的设计, 而且实验测试能验证计算值。第一款成熟的红外成像系统性能预测模型是以理论提出者 Ratches Model

收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 毛谨 (1981-), 男, 四川乐山人, 工程师, 主要从事红外系统总体设计、评价以及试验。

E-mail: maojin999@aliyun.com

的名字命名的^[1]，由美国夜视实验室于 1975 年开发。此模型能很好地对第一代红外扫描成像系统的性能进行预测。第二代面阵红外成像系统 FLIR92 Model^[2] 由美国陆军实验室于 1992 年在 Ratches Model 基础上发展研制，其增加了三维噪声模型，可对扫描和凝视成像系统的性能进行预测。随后，通过引入调制传递函数压缩和新人眼模型，提出了 NVThermal Model^[3]，增加了对红外成像采样效应的影响分析，从而能更好地评估凝视成像系统。1993 年 Ronald J. Pieper 和 Alfred W. Cooper 提出了 Visibility Model^[4]。该模型利用系统阈值输入对比度和温差转移参数计算最小可分辨温差，其包含成像系统采样和混淆的影响，从而能更客观地评价系统的性能。国内，北京理工大学开发了热成像静态性能软件包 SPTIS^[5]，它能实现我国一代通用组件热像仪静态性能的计算和视距估算。本文通过分析四杆靶图像二维（横向和纵向）成像质量，引入了

对比度修正因子。通过真实模拟人眼判断，获取了系统输出的四杆靶与背景的温差。最后通过用阈值输入对比度温差，得到了系统的 MRTD。

1 红外成像系统模型及 MRTD 计算

1.1 红外成像系统的组成

红外成像系统模型主要包括热辐射源、大气扰动和衰减、光学系统、探测器、处理电路、显示系统和人眼。选取具有一定温差、周期频率的四杆靶作为热辐射源。充分考虑由大气扰动和衰减引起图像模糊和强度下降的情况，建立光学系统、探测器、处理电路和显示系统的调制传递函数对图像的影响模型；其中，在探测器模型中加入三维噪声模型（模拟图像横向、纵向以及随时间变化的噪声）；考虑到探测器阵列会引起图像欠采样效应，在图像中加入混淆效应的影响。最终获得的红外成像系统输出温差为四杆靶图像。模型组成如图 1 所示。

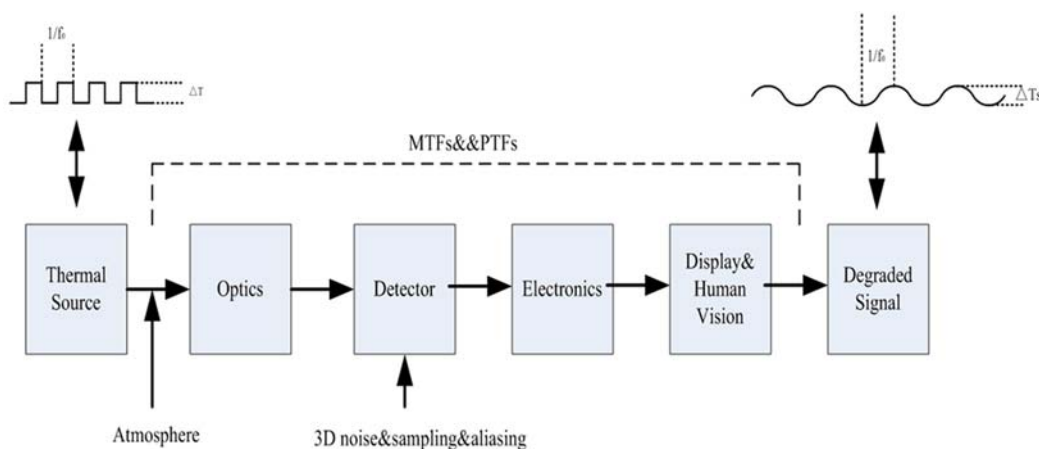


图 1 红外成像系统模型的组成

1.2 红外成像系统四杆靶图像

根据以上建立的模型，针对某红外成像系统的仿真效果图^[6-8]生成的标准四杆靶空间频率为 0.6 cy/mrad，如图 2 所示。其中，a 为生成的原始图像，b 为加入光学效应和噪声后的图像，c、d 为不同频率的四杆靶加入混淆效应后的图像，奈奎斯特频率为 0.96 cy/mrad。

1.3 最小可分辨温差的计算方法

从图 2 可知，由于红外成像系统模糊、混淆

等效应的作用，二维四杆靶图像温差从 ΔT 下降到 ΔT_s ，定义一个温差转移参数 $\alpha(f_z)$ ：

$$\alpha(f_z) = \frac{\Delta T_s}{\Delta T} \quad (1)$$

式中， z 代表图像中横向和纵向两个方向。若仿真中取 $\Delta T = 1$ ，则式 (1) 可简化为

$$\alpha(f_z) = \Delta T_s \quad (2)$$

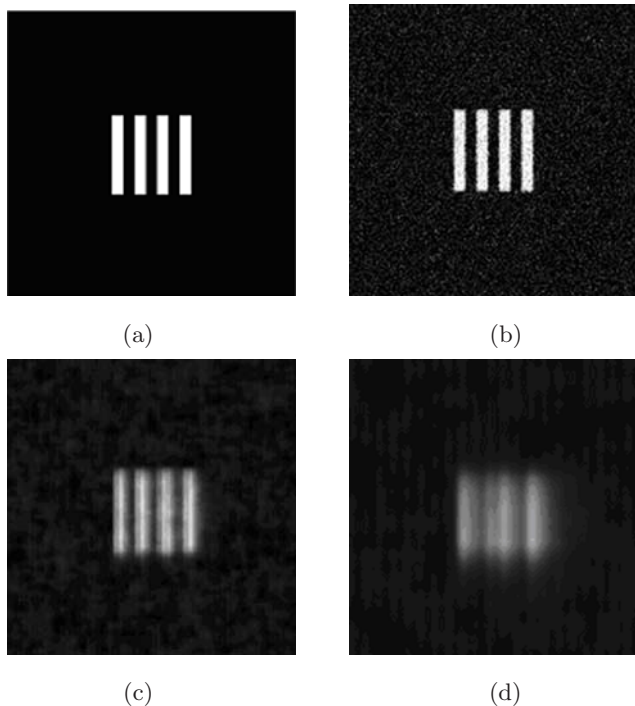


图 2 红外成像系统的仿真效果图 (a) 原始图像 (b) 加入光学效应和噪声后的图像 (c) 0.6cy/mrad 四杆靶加入混淆效应后的图像 (d) 1.2cy/mrad 四杆靶加入混淆效应后的图像

综合考虑观测者和红外成像系统噪声, 定义阈值输入对比度 ΔT_{sc} , 表示通过红外成像系统和人眼作用后能够获得的最小阈值温差, 其表达式为

$$\Delta T_{sc} = \frac{\pi^2}{8} SNR_{thr} \sigma_{tvh} (1 + \frac{\sigma_{vh}^2}{\sigma_{tvh}^2}) E_t^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, SNR_{thr} 为阈值信噪比, 由要求的探测概率决定; σ_{tvh} 为探测器随机三维噪声; σ_{vh} 为固定图像噪声; E_t 为人眼瞬态积分模型。最终的红外成像系统的最小可分辨温差为

$$MRTD(f_z) = \frac{\Delta T_{sc}}{\alpha(f_z)} \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出, 最小可分辨温差的计算主要取决于温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 。根据图 2(d) 采集纵向四杆靶图像沿水平方向的输入输出值, 如图 3 所示。

通过计算图 3 中的 $max1$ 、 $max2$ 、 $max3$ 、 $max4$ 以及 $min1$ 、 $min2$ 、 $min3$ 的值, 取 $[max1 -$

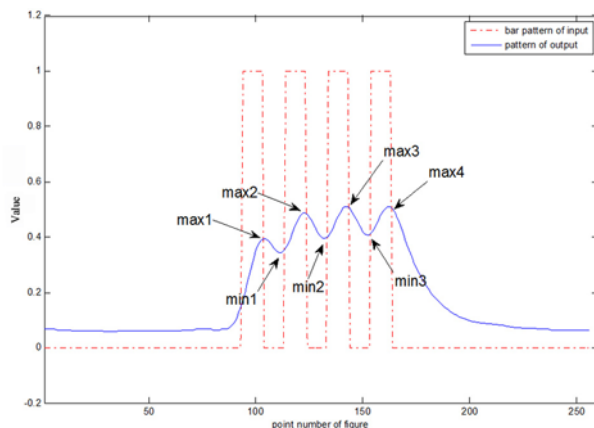
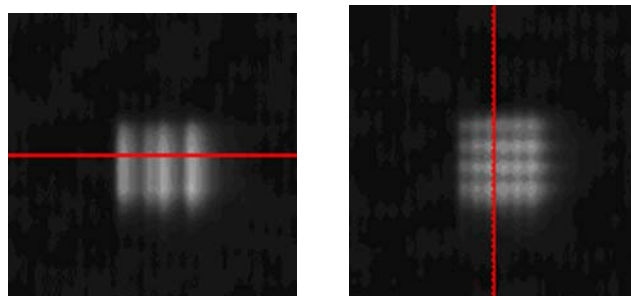


图 3 沿四杆靶图像水平方向的输入输出横向值

$min1$ 、 $max2 - min1$ 、 $max2 - min2$ 、 $max3 - min2$ 、 $max3 - min3$ 、 $max4 - min3$ 中的最小值作为温差转移参数 $\alpha(f_z)$, 获得图像水平方向上的最小可分辨温差。计算图像垂直方向上的最小可分辨温差方法时采用横向四杆靶, 其余与水平方向的相同。

1.4 改进的最小可分辨温差计算方法

红外成像系统输出的纵向四杆靶和横向四杆靶图像如图 4 所示。



(a) 1.2cy/mrad 纵向四杆靶 (b) 1.2cy/mrad 横向四杆靶

图 4 红外成像系统输出的纵向和横向四杆靶图

由图 4 可以看出, 由于模糊和混淆的影响, 纵向和横向四杆靶都难以分辨。两个方向的四杆靶图象存在以下区别:

(a) 纵向四杆靶靶条数量减少, 靶条之间仍然存在明显间隙。由于混淆效应的影响, 靶条与靶条之间的对比度增强。四杆靶条不再完整, 靶条长宽比不再是 7:1, 上半部衰减严重, 下半部仍保留原样 (图中红线为图像中心线)。

(b) 横向四杆靶靶条难以分辨, 没一条靶条完整。整个四杆靶条以小块阵列的形式呈现, 靶

条与间隙之间的对比度衰减严重。靶条长宽比不再是 7:1，左半部衰减严重，右半部仍保留原样(图中红线为对称线)。

从图 4 (b) 可以看出，若仍以图中红线所在的像素点作为计算温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 的采样点来获得系统的最小可分辨温差，则不能充分反映人眼对红外成像系统对输出四杆靶图像的判断。

为了充分反映红外成像系统的性能，真实模拟人眼对四杆靶图像的响应，必须从图像二维方向统一考察四杆靶图像，即增加考虑沿靶长方向的变化对四杆靶成像的影响。因此，在上述温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 的计算过程中加入沿靶长方向的对比度修正因子 β 。 β 的定义如下：强度最弱的四杆靶条的最大值与附近间隙的最大值之差与之和的比值，表达式为

$$\beta = \frac{\max(\min(\text{Value}_{four\ bars})) - \max(\text{Value}_{chip})}{\max(\min(\text{Value}_{four\ bars})) + \max(\text{Value}_{chip})} \tag{5}$$

对比度修正因子 β 的物理意义如下：

(a) 所选四杆靶条是衰减最严重的四杆靶条，若此靶条被背景淹没，不能分辨，则达到四杆靶不能分辨的阈值；

(b) 反映了四杆靶条的调制传递特性。此特性反映了沿靶条方向上靶条的整体性能。随着靶条频率的增加，靶条衰减越严重， β 越小，温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 越接近零，获得的 MRTD 值就越大。

2 实例分析

采用三菱电子的 IR-M500 热像仪^[9] 进行分析，其参数见表 1。其 MRTD 值的测试结果见表 2。

通过对上述热像仪成像建模，对采用传统方法与改进方法获得的最小可分辨温差进行了比较，结果如图 5 所示。

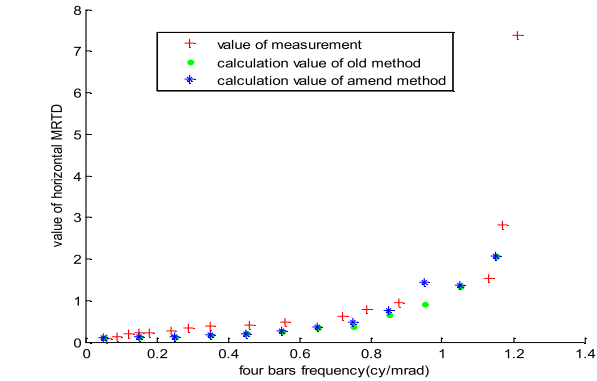
从图 5 可知，对于低频的四杆靶，采用改进方法的计算值与采用传统方法计算的结果差别不大，两种方法的结果都非常逼近真实测量值；对于高频的四杆靶，特别是高于奈奎斯特频率

表 1 IR-M500 热像仪参数

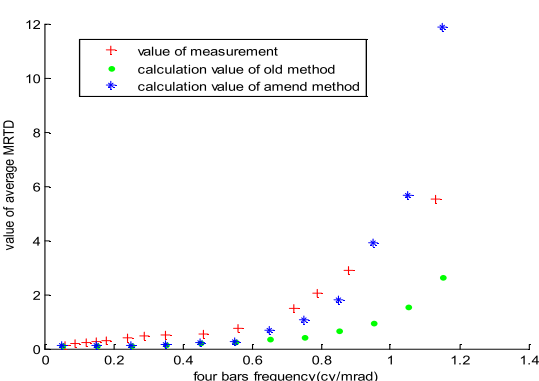
Parameter name	Value
Spectral cut-on	3.0 μm
Spectral cut-off	5.0 μm
F/number	1.4
Focal length	5.0 cm
Optical transmittance	0.95
Frame rate	60 Hz
Detector active horizontal dimension	16.24 μm
Detector active vertical dimension	12.49 μm
D*	$5.0\text{e}10\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$
Integration time	16145.833 μs
Number of horizontal detector elements	512
Number of vertical detector elements	512
Detector cell horizontal dimension	26 μm
Detector cell vertical dimension	20 μm
PtSi emission coefficient	0.161 eV
Schottky barrier height	0.22 eV
Number of active CRT lines	480
3D noise level	MOD

表 2 MRTD 值的测试结果

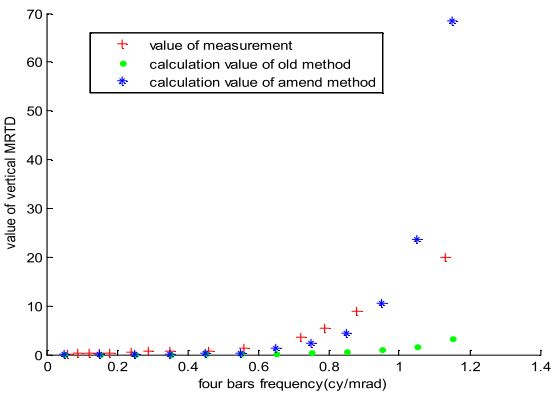
Spatial frequency (cy/mrad)	Horizontal MRTD(C)	Vertical MRTD(C)	Total MRTD(C)
0.06	0.08	0.15	0.17
0.09	0.14	0.25	0.29
0.12	0.19	0.25	0.31
0.15	0.22	0.35	0.41
0.18	0.22	0.40	0.46
0.24	0.28	0.55	0.62
0.29	0.33	0.65	0.73
0.35	0.39	0.70	0.80
0.46	0.42	0.75	0.86
0.56	0.47	1.25	1.34
0.72	0.61	3.65	3.70
0.79	0.78	5.40	5.46
0.88	0.94	8.90	8.95
1.13	1.53	20.00	20.06
1.17	2.83	-	-
1.21	7.39	-	-



(a) 水平方向的 MRTD



(c) MRTD 的平均值



(b) 垂直方向的 MRTD

图 5 红外成像系统 MRDT 的计算和测试结果

的四杆靶, 与传统方法相比, 采用改进方法计算的
的水平方向 MRTD 值有些许提升, 但变化不大,
两种方法的计算结果都接近真实测量结果; 但
在垂直方向上, 采用改进方法计算的 MRTD 值
比用传统方法的结果有很大提升, 并且更加接
近真实测量结果。其原因为: 红外成像系统对纵
向放置和横向放置的高频四杆靶的衰减结果不
一致, 导致图像形式不一致, 如图 4 所示。最终
的平均 MRTD 计算结果也表明, 采用改进方法
的结果比用传统方法计算的结果更接近真实测

量值,改进后的方法对 MRTD 的计算和预测更有效。

3 结论

根据红外成像系统输出视频图像的温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 计算了系统的 MRTD 值,从两个维度方向分析了成像四杆靶图像的质量。通过引入对比度修正因子 β ,改进了温差转移参数 $\alpha(f_z)$ 的计算方法,获得的系统最小可分辨温差更接近测量结果。为红外成像系统性能的设计、评价以及对比测试提供了新的方法和思路。

参考文献

- [1] Ratches J A, Lawson W R, Obert L P. Night Vision Laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing System[R].U.S.Army Electronics Command, Report No1 ECOM 7043, 1975.
- [2] Scott L, Agostino J D. NVEOD FLIR92 Thermal Imaging Systems Performance Model[J].*In Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing III*, G.C.Host, ed., SPIE Proceedings, 1992, **1689**:193–203.
- [3] Driggers R G, Vollmerhausen R, Edwards T. The Target Identification Performance of Infrared Imager Models as a Function of Blur and Sampling[J]. *SPIE Processing*, 1999, **3701**:26–34.
- [4] Pieper R J, Cooper A W. A Visibility Model for MRTD Prediction[J]. *SPIE Proceedings on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, 1994, **2224**:258–269.
- [5] 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, 1995,226–229.
- [6] 彭新红, 吴常泳, 陈雨良. 采样成像系统性能评估[J].*红外与毫米波学报*,2001, **20**(6):447–480.
- [7] 王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥, 等. 采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究 [J].*红外与毫米波学报*, 2004, **23**(6):436–440.
- [8] Wang X. R, He L Y, Bu Q. F. Performance Characterization of Integral Imaging Systems Based on Human Vision [J].*Applied Optics*, 2009, **48**(2):183–188.
- [9] IR-M500 Thermal Imager User's Guide[M]. Mitsubishi Electronics America Inc,1992.
- [59] Wijewarnasuriya P S, Brill G, Chen Y, et al. Pronounced Auger Suppression in Long Wavelength HgCdTe Devices Grown by Molecular Beam Epitaxy [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 65420G.
- [60] Kinch M A, Schaake H F, Strong R L, et al. High Operating Temperature MWIR Detectors [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76602V.
- [61] Piotrowski J, Gawron W, Orman Z, et al. Dark Currents, Responsivity, and Response Time in Graded Gap HgCdTe Structures [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 766031.
- [62] Mitra P, Case F C, Reine M B, et al. MOVPE Growth of HgCdTe for High Performance 3-5 μm Photodiodes Operating at 100-180 K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 589–595.
- [63] Karimi M, Kalafi M, Asgari A. Numerical Optimization of an Extracted HgCdTe IR-photodiodes for 10.6 μm Spectral Region Operating at Room Temperature [J]. *Microelectronics Journal*, 2007, **38**(2): 216–221.
- [64] Gordon N T, Lees D J, Bowen G, et al. HgCdTe Detectors Operating above 200 K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1140–1144.
- [65] Piotrowski A, Madejczyk P, Gawron W, et al. Growth of MOCVD HgCdTe Heterostructures for Uncooled Infrared Photodetectors [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2005, **53**(2): 140–149.
- [66] Manissadjian A, Costa P, Tribolet P M, et al. HgCdTe Performance for High Operating Temperatures [C]. *SPIE*, 1998, **3436**: 150–161.
- [67] Gordon N T, Rees D J, Bowen G, et al. HgCdTe Detectors Operating above 200 K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1140–1144.
- [68] Pillans L, Ash R M, Hipwood L, et al. MWIR Mercury Cadmium Telluride Detectors for High Operating Temperatures [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532W.
- [69] Tennant W E, Cabelli S, Spariosu K. Prospects of Uncooled HgCdTe Detector Technology [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 582–588.
- [70] Ruhlich I, Mai M, Rosenhagen C, et al. Compact High-efficiency Linear Cryocooler in Single-piston Moving Magnet Design for HOT Detectors [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83531T.
- [71] Filis A, Haim Z B, Havatzelet T, et al. RICOR's Rotary Cryocoolers Development and Optimization for HOT IR detectors [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83531U.

(上接第 13 页)