

太赫兹主动焦平面成像系统的 MRC 匹配滤波器模型

田莉, 金伟其*, 蔡毅, 王霞

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要:结合太赫兹辐射源及焦平面探测器特性,同时考虑目标-背景特性、大气衰减及器件衰减等影响,研究建立了太赫兹主动成像系统的最小可分辨对比度匹配滤波器模型.并结合文献示例以及实际太赫兹焦平面主动成像系统的测试结果,验证了最小可分辨对比度模型.结果表明,实验测量值和计算值基本一致,误差在合理范围之内,从而表明了本文模型的有效性.

关键词:太赫兹;主动成像;最小可分辨对比度;匹配滤波器

中图分类号:0434 **文献标识码:**A

The MRC matched filter model of terahertz active focal plane imaging system

TIAN Li, JIN Wei-Qi*, CAI Yi, WANG Xia

(MoE Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the characteristics of terahertz source and focal plane detector, the minimum resolvable contrast(MRC) matched filter model of terahertz active imaging system is established by considering the influence of target-background characteristic, atmospheric attenuation and device attenuation. The MRC model is validated by combining the literature examples and the experimental results of the actual terahertz focal plane active imaging system. The results show that the measured value and the calculated value are basically the same, with the error in the reasonable range, which shows the validity of the model.

Key words: terahertz, active imaging, minimum resolvable contrast (MRC), matched filter

PACS: 4279pw, 4230-d, 41.20-q

引言

太赫兹(Terahertz, THz)是指频率位于0.1~10 THz的电磁波. THz成像作为THz技术的主要应用模式之一,其发展和应用一直引人关注,其中焦平面探测器(Focal Plane Array, FPA)成像分辨率高、时间周期短,但探测器的缺乏使THz FPA成像技术受到限制. 2005年,美国麻省理工学院使用氧化钒(VO_x)非制冷焦平面探测器实现1~7 THz实时成像^[1];2012年,日本电气株式会社(Nippon Electric

Company Ltd., NEC)推出全球首款THz焦平面相机^[2];2013年加拿大国家光学研究所推出THz焦平面相机模块^[3]. 2012年烟台睿创微纳技术有限公司研制出基于 VO_x 和“+”天线的THz焦平面探测器^[4]. 这些器件为发展THz焦平面实时成像提供了良好的技术基础.

性能评价在光电成像系统论证设计测试评价中具有重要地位. 目前红外成像系统有最小可分辨温差(Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD)、最小可探测温差(Minimum Detectable Tem-

收稿日期:2017-05-14,修回日期:2017-09-22

Received date: 2017-05-14, revised date: 2017-09-22

作者简介(Biography):田莉(1986-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究领域为太赫兹成像系统及图像处理. E-mail: tianli3628612@126.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jinwq@bit.edu.cn

perature Difference, MDTD) 等,美国军方夜视与电子传感器部门对这些参数研究提出了多个版本的模型,例如 MRTD 的匹配滤波器模型^[5]、基于目标任务性能准则(Target Task Performance, TTP)的评价模型^[6]等;对于微光夜视系统有最小可分辨对比度模型(Minimum Resolvable Contrast, MRC)^[7]。目前 THz FPA 成像尚无较完善可测试性能评价参数及模型。为此,2005 年以来美国陆军研究实验针对毫米波和亚毫米波/THz 波段成像系统,结合 TTP 和阈值对比度函数(Threshold Contrast Function, CTF),设计开发 THz 成像系统性能预测分析工具^[6]。2014 年,日本 NEC 测量 THz FPA 相机的最小可探测功率(Minimum Detectable Power, MDP)^[8]。本文参照红外系统 MRT 及人眼视觉匹配滤波器模型,研究 THz 成像系统 MRTD 模型,为 THz 成像系统设计和应用提供理论和工具。

1 THz 主动成像系统的组成

THz 主动成像系统的成像传递过程如图 1,照明系统包括激光器与光学系统,光学系统将激光器发出的 THz 辐射投射到检测物体上;THz 辐射经物体细节的透射或反射特性的调制后再次经过成像系统成像在 THz 探测器上。探测器将景物的 THz 辐射分布转变为图像电信号和数字图像信号,经过信号处理等环节再转化为模拟/数字视频信号在显示屏显示,最后由人眼观测并做出相应判断。图中, L_l 为激光器到检测物体平面的实际距离; L_i 及 L_o 为成像物距和像距。

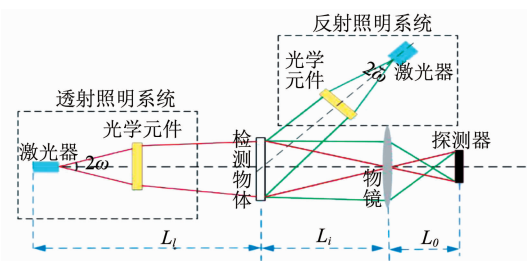


图 1 THz 成像系统信号传递过程

Fig.1 The signal transmission process of THz imaging system

2 THz 主动成像系统的调制传递函数

成像系统信号分析中,使用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)来描述成像系统及人眼/脑对信号的响应函数。 H_{sys} 为系统的 MTF,由系统光学元件 MTF、探测器 MTF、图像处理 MTF、

显示屏 MTF 及人眼 MTF 等几部分组成。

2.1 光学系统 MTF

光学系统的 MTF 主要包括衍射传递函数和像差传递函数,其数学表达式分别为:

(a) 衍射效应 MTF 为^[9]:

$$H_o = \begin{cases} \frac{2}{\pi} [\arccos(f/f_c) - (f/f_c) \{1 - (f/f_c)^2\}^{1/2}] & (f > f_c) \\ 0 & f \leq f_c \end{cases}, (1)$$

式中, f_c 为光学系统的空间截止频率, $f_c = D_{ap}/(\lambda \times 1000)$,单位为 cyc/mrad。

(b) 像差 MTF 为:

在非衍射光学系统中,像差引起的弥散斑为高斯型分布,其 MTF 为^[10]:

$$H_{ber}(f) = \exp(-2\pi\sigma^2 f^2), (2)$$

式中 σ 为弥散圆角宽度, ρ 为弥散圆直径, Q 为弥散圆区域内能量所占百分比, f 为物镜焦距。

于是,光学系统总的 MTF 为:

$$H_o(f) = H_{diff}(f)H_{ber}(f). (3)$$

2.2 探测器 MTF

探测器为成像系统核心部件,一般矩形像元探测器的 MTF 为^[9]:

$$H_{det_{sp}}(f) = \frac{\sin(\pi DAS_x f)}{\pi DAS_x f} = \text{sinc}(\pi DAS_x f), (4)$$

式中, $DAS_x = \text{IFOV} = a/f'$ 为探测器单元的空间张角,单位 mrad, a 为探测器有效尺寸。

2.3 图像处理 MTF

电子变焦(Electronic Zoom, Ezoom)是将在水平和垂直方向上进行插值,从而实现数字图像放大的处理过程。Ezoom 改变水平方向放大倍率(Magnification of the System, SMAG),从而改变探测器垂直视场(Vertical Field of View, VFOV)。目前 Ezoom 常用双线性插值,其 MTF 可表示为^[11-12]:

$$H_{zoom}(\xi) = 0.5^2 \left[1 + \sum_{n=1}^N 2w_n \cos(\pi(2n-1)ss\xi) \right] \cdot \left[1 + \sum_{n=1}^N 2w_n \cos\left(\pi(2n-1)\frac{ss}{2}\xi\right) \right], (5)$$

式中, ss 为采样间距,单位 mrad; w_n 为权重系数,其和为 1。

2.4 显示器 MTF

一般显示器 MTF 与像元形状^[9, 11]以及像元在物空间的角尺寸有关。如图 2,系统水平 SMAG 与显示器垂直尺寸、人眼到显示器距离(视距)以及相机垂直视场有关:

$$\text{SMAG} = \frac{\tan(\text{FOV}_d/2)}{\tan(\text{VFOV}/2)} = \frac{h_d/l_d}{\text{VFOV}}, (6)$$

式中, VFOV 单位 rad; h_d 为显示器高度, 单位 m; l_d 为人眼距显示器的距离, 单位 m.

(a) 矩形像元

一般矩形像元显示器的 MTF 为:

$$H_m(\xi) = \text{sinc}(\alpha_H \xi) \quad (7)$$

(b) 圆形像元

一般圆形像元显示器上光亮点符合高斯分布:

$$H_m(\xi) = e^{-\pi^2 \xi^2 a_H^2} \quad (8)$$

式中, α_H 为显示器像元尺寸 pix_h 对应探测器视场的角尺寸: $\alpha_H = 17.25 \times \text{VFOV} \times \text{pix}_h / h_d$.

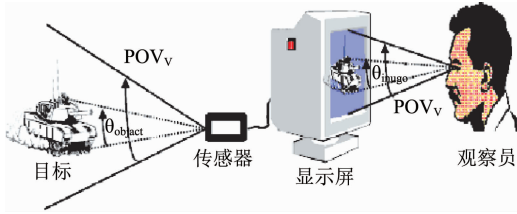


图2 系统放大倍率

Fig. 2 System magnification

2.5 系统 MTF

THz 成像系统可作为线性不变系统, 其系统 MTF 为各分系统 MTF 的乘积, 即:

$$H_{\text{sys}} = H_o \times H_d \times H_m \times H_{\text{zoom}} \quad (9)$$

3 THz 主动成像系统 MRC 的匹配滤波器模型

3.1 能量传递与信号分析

3.1.1 能量传递分析

如图3, 照明系统激光器发出 THz 辐射功率为 Φ , 光束发散半角为 ω , 光斑半径为 r_l , 焦距为 f_l , 激光器到检测物体的等效距离为 l ($l \leq L_l$), 检测物体平面上被照明区域的半径和面积分别为:

$$R_s = r_l + \omega l \quad (10)$$

$$R_s = r_l + \omega l \quad (11)$$

THz 辐射在物平面上形成的辐照度为:

$$E_0 = \frac{\Phi}{A_0} \tau_l \quad (12)$$

其中 τ_l 为照明系统光谱透射比, $\tau_l = \tau_{la} \times \tau_{lo}$, τ_{la} 照明系统大气光谱透射比, τ_{lo} 为光学元件透射比.

根据大气衰减朗伯定律, 照明系统大气光谱透射比 τ_{la} 为:

$$\tau_{la} = \exp(-\alpha(\lambda) \times L_l / 4.343) \quad (13)$$

其中, $\alpha(\lambda)$ 为衰减系数, 描述大气传输对辐射的衰减, 单位为 dB/m.

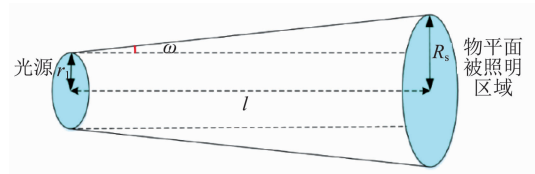


图3 物平面被照明区域

Fig. 3 The area of the object is illuminated

成像系统像面光敏元面积为 A_i , 系统垂轴放大率为 β , 物距为 L_i 时, 对应检测物体成像面积为:

$$A_{do} = A_i / \beta^2 \quad (14)$$

该面积上出射能量为:

$$P_{x0} = A_{do} \rho_x G E_0 \quad (15)$$

假设物平面的辐射符合朗伯分布, 其出射辐亮度为:

$$L_{x0} = \frac{A_{do} \rho_x G E_0}{\pi} \quad (16)$$

式中, t 和 b 分别表示目标和背景细节; ρ 表示物体透射或反射系数; G 为目标背景的表面反射增益, $G = 4\pi / \Omega_r$, Ω_r 为反射光束的立体角, $\Omega_r = 4\pi \sin^2(\omega_r / 2)$ [6].

成像系统光瞳上的辐照度为:

$$E_{As} = \frac{P_{x0} \tau_i}{4\pi L_i^2} \quad (17)$$

式中, τ_i 为成像系统的光谱透射比, 根据式(13), $\tau_i = \exp(-\alpha(\lambda) \times L_i / 4.343)$.

成像系统光瞳直径为 D_{ap} , 光瞳面积为 $A_{ap} = \pi (D_{ap}/2)^2$, 光瞳透过率为 τ_{ap} , 则目标背景入射到探测器光敏单元上的辐射能量分别为:

$$P_x = E_{As} A_{ap} \tau_{ap} \quad (18)$$

将目标与背景的表现对比度定义为:

$$C = \frac{|L_t - L_b|}{L_t + L_b} \quad (19)$$

假设探测器转换效率为 τ_{ant} , 则光敏面元上信号能量为:

$$\begin{aligned} P_0 &= \tau_{ant} |P_t - P_b| = \frac{\pi \tau_i \tau_{ant} \tau_{ap} A_{ap}}{4\pi L_i^2} |L_{t0} - L_{b0}| \\ &= C \frac{\pi \tau_i \tau_{ant} \tau_{ap} A_{ap}}{2\pi L_i^2} L_a \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $L_a = (L_{t0} + L_{b0})/2$, 为目标背景平均辐亮度.

3.1.2 信号分析

当具有某一空间频率的高宽比为 7:1 的均匀辐亮度 L_t 四条带目标图案, 处于均匀辐亮度 L_b 的背景中, 测试图案经成像系统成像并显示在显示屏上,

对于某一确定的空间频率 f , 观察者经过无限长时间的观察恰好能分辨 (50% 概率) 出条带目标图案时, 目标与背景的对比度之差被称为平均辐亮度 L_a 条件下对应该空间频率的最小可分辨对比度, 记为 $MRC(f, L_a)$ [13]. 如图 4 四条带测试图案目标宽度为 W , 其空间角频率 $f = R_l/2W$ (R_l 为观察距离). 根据美国 FILR92 模型 [9, 10, 14, 15] 近似用一级谐波代替信号强度分布函数 (如图 5), 因此经过系统后信号强度分布为:

$$i(x, y) = [(\text{幅度为} 0.5 \text{的方波}) + 0.5] \otimes h_{\text{sys}}(x, y) \approx \text{MTF}_{\text{sysx}}(f) \frac{4}{\pi} (0.5) \sin(2\pi fx) i_y(y) + 0.5, \quad (21)$$

其中, h_{sys} 为系统对信号的响应函数, $i_y(y)$ 是与靶长相关的降质垂直窗函数, 其傅里叶变换为: $I_y(f_y) = L \text{sinc}(Lf_y) \text{MTF}_{\text{sysy}}(f_y)$.

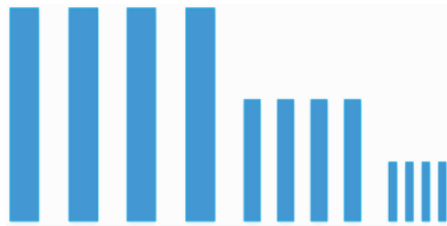


图 4 四条带测试图案
Fig. 4 Four bands test pattern

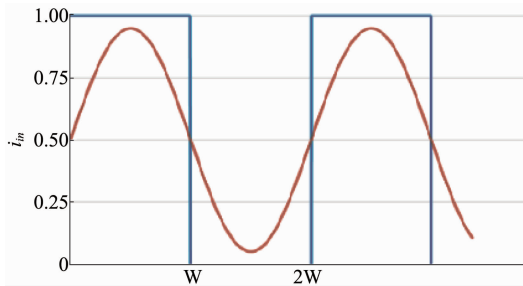


图 5 近似周期方波信号
Fig. 5 Approximate periodic square wave signal

对于 THz 主动成像系统, 已知辐射源、目标背景及探测器特性, 则图像上信号能量分布为:

$$s_{\text{out}_d}(f) = P_0 i(x, y) \quad (22)$$

人眼/脑对周期信号的响应函数为 h_{eye} , 因此经过人眼/脑后的信号为:

$$s_{\text{eye}}(f) = \max(s_{\text{out}_d} \otimes h_{\text{eye}}) - \min(s_{\text{out}_d} \otimes h_{\text{eye}}) = \max(P_0 \times i(x, y) \otimes h_{\text{eye}}) - \min(P_0 \times i(x, y) \otimes h_{\text{eye}}) \quad (23)$$

人眼/脑对信号的响应可等效为部分匹配滤波器, 即人眼/脑的 H_{eye} 与输入信号频谱 $S_{\text{in}}(f)$ 及系统

传递函数 $H_{\text{sys}}(f)$ 有关, 且信号 s_{eye} 在 x 方向为正与负半周平均信号之差, 在 $y = 0$ 处为响应最大值:

$$H_{\text{eye}}(f) = S_{\text{in}}(f) H_{\text{sys}}(f) \quad (24)$$

$$s_{\text{eye}}(f) = P_0 \frac{4}{\pi} H_{\text{sysx}}(f) \frac{1}{W} 0.5 \left[\int_0^{1/2f} \sin(2\pi fx) dx - \int_{1/2f}^{1/f} \sin(2\pi fx) dx \right]$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} I_y(f_y) H_{\text{eye}_y}(f_y) \exp | (j2\pi f_y y) |_{y=0} df_y$$

$$= P_0 \frac{8}{\pi^2} H_{\text{sysy}}(f_x) \times L \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(Lf_y) H_{\text{sysy}}^2(f_x) df_y \quad (25)$$

式中, H_{sys} 、 H_{sysx} 、 H_{sysy} 分别为系统调制传递函数、系统在 x 方向以及 y 方向的 MTF. 并且令:

$$\begin{cases} p_x(x) = \frac{8}{\pi^2} H_{\text{sysx}}(f_x) \\ p_x(y) = L \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(Lf_y) H_{\text{sysy}}^2(f_y) df_y \end{cases} \quad (26)$$

最后, 四条带靶标图案经过系统及人眼/脑后形成的信号为:

$$s_{\text{eyex}}(f) = P_0 p_x(x) p_y(y) = C \frac{\pi \tau_i \tau_{\text{out}} \tau_{\text{ap}} A_{\text{ap}}}{2\pi L_i^2} L_a p_x(x) p_y(y) \quad (27)$$

3.2 噪声分析

3.2.1 探测器成像组件噪声

探测器组件的自身噪声会影响图像质量. 已知探测器组件的噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP), 一维像元空间带宽为 P_{spbw} (单位 cyc/mrad), 则噪声的功率谱密度可近似表示为 [6]:

$$S_n = \frac{(\text{NEP})^2}{P_{\text{spbw}}} \quad (28)$$

1999 年 Barton 等基于心理学数据拟合出基于多个信息通道的人眼视觉滤波器模型 [6, 12], 并指当信号频率为 f 时, 人眼对噪声的感知为:

$$H_{\text{per}}(\xi, f) = \exp\left(-2.2 \left[\log\left(\frac{\xi}{f}\right)\right]^2\right) \quad (29)$$

于是, 经过系统及人眼后探测器噪声为:

$$[n_{\text{NEP}}(f)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\text{NEP})^2}{P_{\text{spbw}}} |H_{\text{per}}(\xi, f) H_{\text{post}}(\xi)|^2 d\xi \quad (30)$$

式中, H_{post} 与显示器及人眼 MTF 有关.

3.2.2 光源噪声

如图 6 所示, 一般 THz 辐射源为高斯光束, 对固定系统预先进行标定可减少照明光源不均匀影响. 但是, THz 辐射源采用的激光光源具有强相干

性,对物体进行成像时无法忽略散斑噪声(Laser Speckles)形成的固定图案噪声(Fixed Pattern Noise, FPN),如图7所示。

一般散斑噪声为乘性噪声,其功率谱密度为^[16]:

$$S_{\text{speckle}}(\xi) = L_p H_o(\xi) / \left(\int_0^\infty H_o(\xi) d\xi \right), \quad (31)$$

式中, H_o 为成像光学系统 MTF; L_p 为平均显示亮度, $L_p = P_0$.

经过系统及人眼后光源噪声为:

$$[n_{\text{speckle}}(f)]^2 = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{speckle}}(\xi) |H_{\text{per}}(\xi, f) H_{\text{post}}(\xi)|^2 d\xi, \quad (32)$$

式中, M 为独立散斑图样的个数, $M = D_{ap}/D_{sp}$, D_{sp} 为散斑直径, $D_{sp} = \lambda/(2\omega)$, λ 为工作波长。

探测器噪声与光源噪声线性无关,且后者为乘性噪声,因此系统水平方向噪声功率谱为:

$$n^2(f) = [n_{\text{NEP}}(f)]^2 + [n_{\text{speckle}}(f)]^2. \quad (33)$$

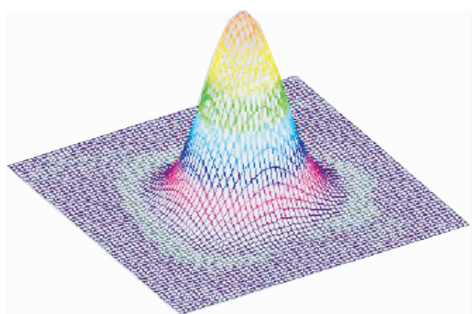


图6 THz 辐射分布图
Fig.6 The distribution of THz beam

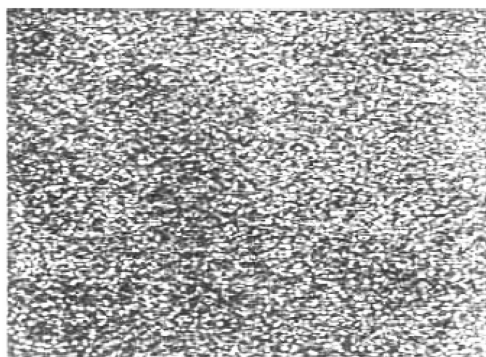


图7 激光散斑场分布
Fig.7 The distribution of laser speckle

3.3 信噪比

结合式系统信号及式系统噪声,可得系统水平方向的信噪比为;

$$\text{SNR}_x(f) = \frac{s_{\text{eyex}}(f)}{\sqrt{[n_{\text{NEP}}(f)]^2 + [n_{\text{speckle}}(f)]^2}}. \quad (34)$$

3.4 MRC 匹配滤波器模型

系统能够分辨目标的条件是系统信噪比大于阈值信噪比 SNR_{Thx} , 根据式可得:

$$\text{SNR}_x = \frac{C \frac{\pi \tau_i \tau_{ant} \tau_{ap} A_{ap}}{2\pi L_i^2} L_a p_x(x) p_y(y)}{\sqrt{[n_{\text{NEP}}(f)]^2 + [n_{\text{speckle}}(f)]^2}} \geq \text{SNR}_{\text{Thx}}, \quad (35)$$

则等号成立时对应的对比度就是系统水平方向 MRC:

$$\text{MRC}_x(f, L_a) = \frac{\text{SNR}_{\text{Thx}}}{L_a} \frac{2\pi L_i^2 \sqrt{[n_{\text{NEP}}(f)]^2 + [n_{\text{speckle}}(f)]^2}}{\pi \tau_i \tau_{ant} \tau_{ap} A_{ap} p_x(x) p_y(y)}. \quad (36)$$

本文采取的是匹配滤波器模型,为有利于区分,这里将式(36)称为 MRC 匹配滤波器模型。

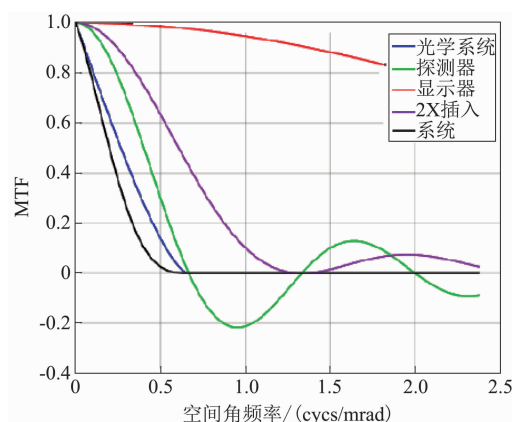


图8 系统 MTF
Fig.8 The MTF of the system

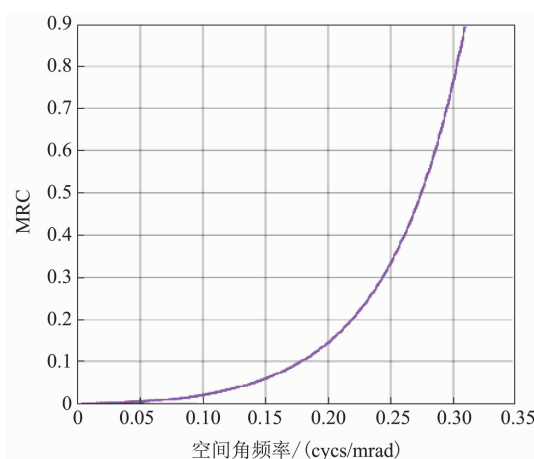


图9 系统 MRC 与空间角频率关系
Fig.9 The relation of system MRC and f

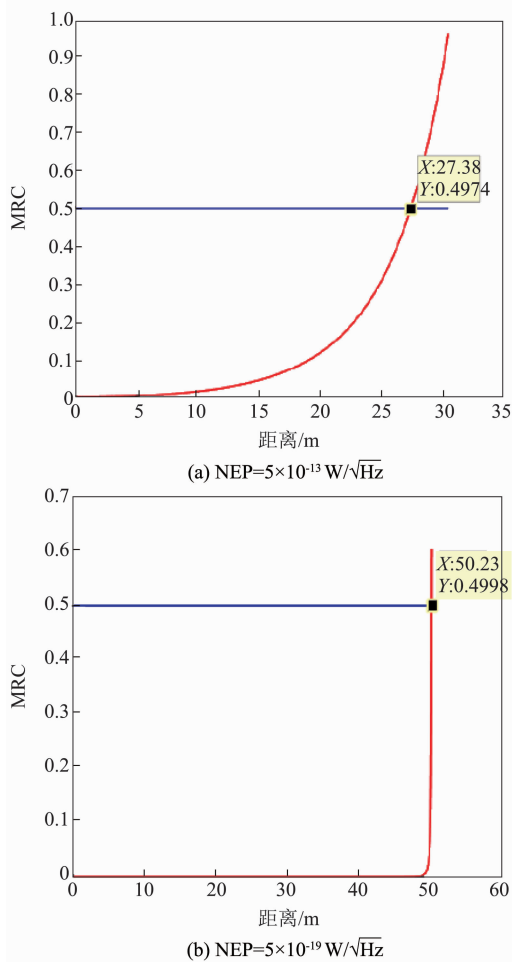


图 10 不同探测器 NEP 条件下系统 MRC 与成像距离关系

Fig. 10 The relationship between the system MRC and imaging distance with different detector NEP

4 MRC 匹配滤波器模型的验证

为验证模型有效性,采用文献成像系统计算对比及实际焦平面成像系统计算和测试结果对比。

4.1 参考系统 MRC

文献[6]基于 TTP 及 CTF 建立了系统目标转换概率函数(the Target Transform Probability Function, TTPF). 为了对模型进行验证时,给出了一个 THz 主动成像系统的计算结果,设置的系统参数为^[6]:主动照明:波长为 650 GHz,出射辐射功率为 0.5 mW;大气衰减:60 dB/km;探测器与目标距离:10 m;目标背景参数:目标反射率为 0.9;背景反射率为 0.3;物镜参数:焦距为 1.0 m;F 数为 3.279;显示器:类型为 CRT;像元尺寸为 0.24 mm;显示像元数目为 60 × 120;插入因子为 2(4 × zoom);人眼观察显示器的距离为 45.72 cm;显示器亮度为 30.0 cd/m²;探测

器参数: $NEP = 5 \times 10^{-13} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$;水平视场为 5.5° ;垂直视场为 4.125° ;瞬时视场为 1.8 mrad;焦距为 1 m;F 数为 3.279;采样间距为 0.6 mrad;半采样频率为 0.833 cyc/mrad;系统放大率为 1.75;耦合效率为 0.5;遮挡物参数:透过率为 0.7;分辨任务难度因子为 20.8 cyc;目标背景均为朗伯反射体. 文献[6]给出该系统对于临界尺寸为 7.62 cm 的目标,在无系统噪声、无大气衰减、无遮蔽物条件下,分辨概率为 50% 时的最远可分辨距离为 55 m. 采用本文 MRC 模型进行系统性能分析. 根据式(36)计算系统各组件的 MTF, 曲线如图 8. 根据式(37), 已知目标背景反射率则系统中 L_a 为定值, 系统 $MRC(f, L_a)$ 仅为 f 函数, 其曲线如图 9.

4.2 实验系统 MRC

由式(20)及式(36)可知,在 THz 主动成像系统及实验条件等均固定的情况下,系统 MRC 仅与辐射源特性有关. 因此,可通过固定 MRC 靶标的最小可分辨时对应的辐射源功率进行计算及测量,验证模型的有效性. 当 MRC 固定时,辐射源功率为:

$$\Phi = \frac{\text{SNR}_{\text{THz}} \sqrt{[n_{\text{NEP}}(f)]^2 + [n_{\text{speckle}}(f)]^2}}{\text{MRC}(f, L_a)_x} \cdot \frac{4\pi L_i^2 \beta^2}{G(\rho_t + \rho_b) \tau_i \tau_l \tau_{ap} \tau_{ant} p_y(y)} \frac{A_0}{A_i A_{ap}} \quad (37)$$

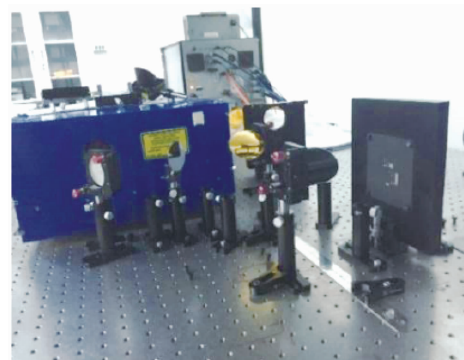


图 11 THz 透射成像系统

Fig. 11 THz transmission imaging system

图 11 为实验用 THz FPA 主动成像系统,其中照明系统结构如图 12 所示,由 THz 辐射源、反射镜以及离轴抛物面反射镜组成,且辐射源位于照明系统物方焦点,照明系统出射平行光束,为物平面提供均匀照明;辐射源为功率可调的二氧化碳泵浦甲醇气体激光器 SIFIR-50FPL^[17], THz FPA 相机为日本 NEC 公司 IRV-T0831C^[18]. 该 THz FPA 主动成像系统的主要参数如表 1 ~ 5 所示,并且一般 FPA 器件

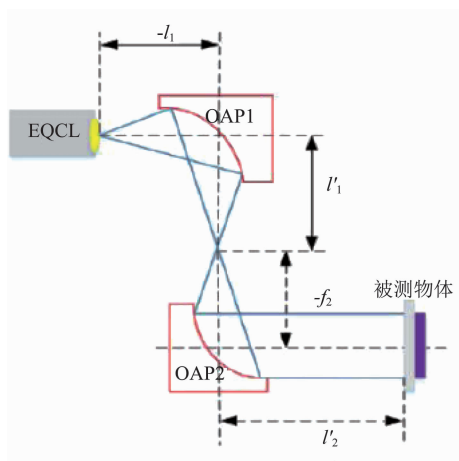


图 12 照明系统示意图
Fig. 12 The diagram of the lighting system

耦合效率为 0.1. 本文采用了金属镂空靶标, 由于金属对于 THz 透过率为 0, 镂空部分对 THz 透过率为 1, 故可以认为测试靶标的对比度为 1; 成像系统对靶标的成像状态如图 13 所示. 测试靶标的宽度为 1 mm, 设置靶标距离分别为 75 mm、100 mm、125 mm、150 mm、175 mm 时, 可获得靶标的不同空间角频率为 0.075、0.1、0.125、0.15、0.175 cyc/mrad.



图 13 测试靶标的成像情况图像
Fig. 13 Image of the imaging condition of the test target

表 1 THz 辐射源参数

Table 1 Parameters of the THz laser

| 名称 | 数值 |
|-------------|---------------------------------|
| 中心频率/THz | 3.11 |
| 激光器 输出功率/mW | 0-20 |
| 发散角 | ~5° |
| 照明光学元件 OAP1 | 焦距 50.8mm, 口径 50.8mm, 反射率 >90% |
| OAP2 | 焦距 152.4mm, 口径 50.8mm, 反射率 >90% |
| 反射镜 | >90% |

式 (1-9) 计算系统各组件的 MTF 曲线如图 14

表 2 IRV-T0831C 相机参数

Table 2 Parameters of the camera: IRV-T0831C

| 名称 | 非制冷微测辐射热计 |
|------|---|
| 组成 | 320 × 240, 像元间距 23.5 μm |
| 视场 | 15.0° × 11.2° (使用 IRV-TL028 光学镜片) |
| NEP | <100pW@4THz |
| 频率范围 | 1 ~ 7 THz |
| 帧频 | 8.5 Hz |
| 光学元件 | IR/V-TL028: THz 透镜 (焦距为 28.2mm, F/1.1) IR/V-TL030: 红外滤波器 (截断频率约为 300 cm ⁻¹ (= 9 THz)) |

表 3 显示器参数

Table 3 Parameters of the display

| 类型 | 分辨率 | 像元尺寸 | 尺寸 | 屏幕比例 | 视距 |
|-------|---------------|----------|-------|------|--------|
| 液晶显示器 | 1 280 × 1 024 | 0.285 mm | 17 英寸 | 5:4 | 100 cm |

表 4 人眼参数

Table 4 Parameters of human eye

| 阈值信噪比 | 人眼积分时间 | 人眼传递函数 |
|-------|--------|--------|
| 2.5 | 0.2 | 匹配滤波器 |

表 5 系统各部分距离

Table 5 The distances of the system

| OAP1 与其聚焦点距离 | OAP1 与 OAP2 距离 | OAP2 与物平面距离 |
|--------------|----------------|-------------|
| 67.6 mm | 220mm | 218mm |

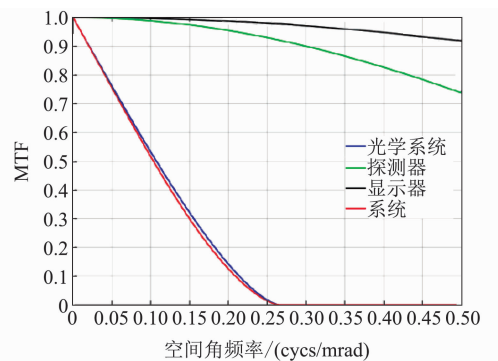


图 14 系统 MTF
Fig. 14 MTF of the system

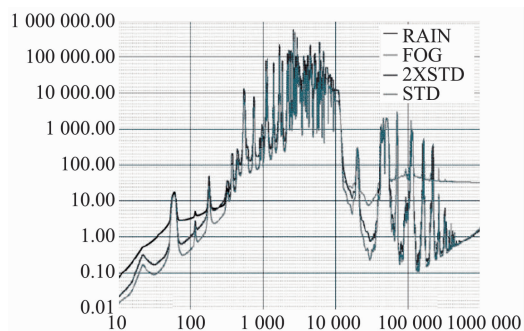


图 15 THz 波段大气衰减系数^[19]
Fig. 15 The Atmospheric attenuation of THz

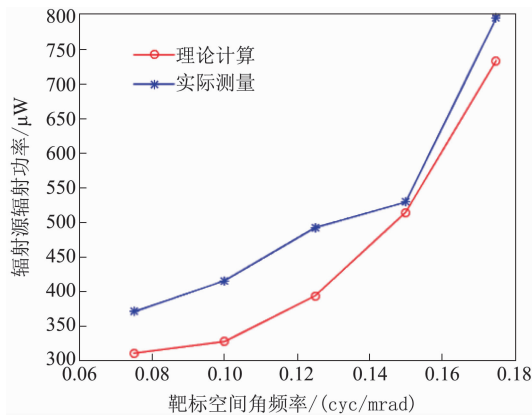


图 16 辐射源功率与空间角频率关系

Fig. 16 Relationship between the radiation source power and spatial angular frequency

所示. 其中照明系统总距离约为 624.4 mm; 照明面积约为 3.05 cm^2 ; 系统放大率 SMAG 约为 1.28; 照明系统总距离及成像面积与成像物距有关; 标准大气下 3.11 THz 的衰减系数约为 1 dB/m (如图 15)^[19]; 根据式可计算照明及成像系统透过率.

对于系统中的探测器噪声和散斑噪声进行近似计算, THz 辐射源功率为 mW 量级, 根据式计算散斑噪声量级约 10^{-30} W , 根据式探测器噪声量级约 10^{-10} W , 故系统噪声主要为探测器噪声.

表 6 辐射源功率理论计算值及实际测量值/ μW
Table 6 Theoretical calculation and actual measurement value of the radiation source power

| 距离/mm | 实际测量 | 理论计算 |
|-------|------|----------|
| 75 | 370 | 309.7944 |
| 100 | 415 | 326.6931 |
| 125 | 480 | 393.0046 |
| 150 | 529 | 514.2155 |
| 175 | 769 | 734.3070 |

在 $MRC = 1$ 条件下, 对测试靶标最小可分辨时的辐射源功率进行计算, 其与实际测量值的结果如表 6 所示, 两者 MRC 曲线的对比如图 16 所示, 图中红线为计算值, 蓝线为实际测量值, 两者的趋势基本一致, 但存在一定误差. 鉴于美国最早的热成像系统作用距离模型预测结果与实际测量存在 30% 的误差, 随着模型改进误差逐步减小, 本世纪初研制的 CFLIR 模型对热成像系统作用距离的预测也大约有 15% ~ 20% 的误差, 因此本文误差在正常范围之内, 这也表明本文模型的有效性.

5 结论

随着器件技术的发展和应用的的需求, THz 主动

成像系统的应用日趋迫切. 在参考热成像系统 MRTD 模型及微光成像系统 MRC 模型的基础上, 本文结合 THz 辐射源及焦平面探测器特性, 同时考虑目标-背景特性、大气衰减及器件衰减等影响, 研究建立了 THz 主动成像系统的 MRC 匹配滤波器模型. 并结合参考文献中示例 THz 成像系统的计算结果以及实际 THz FPA 主动成像系统的计算和测试结果的对比, 结果表明: 实验测量值和计算值基本一致, 误差在合理范围之内, 从而表明了本文模型的有效性.

目前在 MRC 匹配滤波器模型推导过程中, 尚未进一步深入分析 THz 辐射源的强相干性给系统带来附加固定图案噪声的影响; 且由于条件限制, 系统中图像处理 MTF 等的影响也未深入分析, 这些将在进一步的研究中逐步完善.

References

- [1] Lee A W, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Optics letters*, 2005, **30**(19): 2563 - 2565.
- [2] JIN Wei-qi, TIAN Li, WANG Hong-chen, et al. Review of THz Focal Plane Detector and the Development of Its Imaging Technology [J]. *Infrared Technology*, (金伟其, 田莉, 王宏臣, 等. THz 焦平面探测器及其成像技术发展综述. *红外技术*) 2013, **35**(4): 187 - 194.
- [3] INO. IRXCAM-THz-384 [OL]. (2013) [2017. 5. 14]. <http://www.ino.ca/en/technologies/imaging%20systems/terahertz-camera-module/>.
- [4] TIAN Li, JIN Wei-qi, CAI Yi, et al. Imaging area and contrast of THz focal plane array CW transmission imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, (田莉, 金伟其, 蔡毅, 等. THz 焦平面连续波透射成像系统的成像面积及对比度. *光学精密工程*) 2015, **23**(8): 2164 - 2170.
- [5] Scott L B, D'Agostino J A. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model [C]. *Aerospace Sensing*, 1992: 194 - 203.
- [6] Murrill S R, Jacobs E L, Moyer S K, et al. Terahertz imaging system performance model for concealed-weapon identification [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(9): 1286 - 1297.
- [7] Bijl P. Bias-free procedure for the measurement of the minimum resolvable temperature difference and minimum resolvable contrast [J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(10): 1735 - 1742.
- [8] Oda N, Hosako I, Ishi T, et al. The Need of Terahertz Cameras for Standardizing Sensitivity Measurements [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, **35**(8): 671 - 685.
- [9] Lloyd J M. *Thermal imaging systems* [M]: Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] Ratches J A, Lawson W R, Obert L P, et al. *Night vision laboratory static performance model for thermal viewing systems* [M]. In: DTIC Document; 1975: 8 - 9.

(下转第 693 页)