

文章编号 1004-924X(2015)08-2164-07

THz 焦平面连续波透射成像系统的成像面积及对比度

田莉, 金伟其*, 蔡毅, 刘敬, 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:研究了 THz 辐射和 THz 焦平面器件的特性, 分析了 THz 焦平面探测器连续波透射成像系统的能量传输过程。考虑大气衰减、器件限制等影响因素以及连续激光照射、目标场景与焦平面探测器之间的信号传递关系, 推导出了连续波透射成像系统的成像面积及对比度两个重要的参量模型。然后设计并组建了连续波 THz 透射成像系统。根据所建模型分别对信封中的环三亚甲基三硝铵(RDX)粉末和塑料盒中的金属刀片两种不同被测物体的成像面积及对比度进行了计算。结果表明:基于理论推导的两种实例其最大成像面积可达 $4.74\text{ cm} \times 6.32\text{ cm}$ 和 $3.534\text{ cm} \times 4.712\text{ cm}$, 图像对比度分别为 0.242 2 和 0.306。与美国麻省理工学院(MIT)的成像系统进行了对比, 该系统的成像面积为 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 或 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 与本文推导结果处于同一数量级, 由此验证了本文提出的模型和方法的合理性和有效性。

关键词: THz 焦平面阵列探测器; 连续波透射成像; 照明系统; 成像面积; 成像对比度

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2164

Imaging area and contrast of THz focal plan array CW transmission imaging system

TIAN Li, JIN Wei-qi*, CAI Yi, LIU Jing, WANG Xia

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

* Corresponding author, E-mail: jinwq@bit.edu.cn

Abstract: The characteristics of THz radiation and a THz Focal Plane Array(FPA) detector were re-searched, and the energy transmitting processing of a continuous wave imaging system in the FPA detector was analyzed. In consideration of the atmospheric attenuation, device limitation, and the signal transfer relation of continuous laser irradiation, target scene and the FPA detector, two parameter models for the imaging area and contrast ratio of the continuous wave imaging system were derived. Then, a continuous wave imaging system was designed. According to derived models, the imaging areas and contrasts of two different objects (one is the envelope with cyclotrimethylene trinitramine (RDX) powders and the other is the plastic case with metal blades) were calculated. The obtained results show that the imaging areas of the two examples are $4.74\text{ cm} \times 6.32\text{ cm}$, $3.534\text{ cm} \times 4.712\text{ cm}$, and the contrasts are 0.242 2 and 0.306 respectively. The results are compared with that of the imaging system with the imaging area of $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ or $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ from the Massachusetts Institute of Tech-

收稿日期: 2015-02-04; 修订日期: 2015-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 61231014)

nology(MIT). They are derived in the same order of magnitude, which verifies that the proposed models and method are reasonable and effective.

Key words: THz Focal Plane Array(FPA) detector; continual wave transmission imaging; illumination system; imaging area; imaging contrast

1 引言

太赫兹(THz)波是指频率位于 $0.1\sim 10$ THz(波长为 $30\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$),介于红外与毫米波之间的电磁波。THz波具有瞬态性、宽带性、相干性、低能性等特点,因此在安全检测/环境监测、医疗诊断、波谱分析、成像与通信等领域展现出广阔的应用前景,并已成为国内外研究的重要方向之一。

连续波THz成像技术是THz技术的主要应用模式之一。自2005年美国麻省理工学院(MIT)提出采用 VO_x 焦平面探测器实现THz焦平面成像以来,THz焦平面探测器及其成像技术受到了国内外科研人员的普遍重视。2012年,日本电气有限公司(NEC)在全球首次推出了THz焦平面相机IRV-T0831^[1],实现了THz焦平面的被动和主动成像。2013年,加拿大光学研究所(INO)推出了THz焦平面组件IRXCAM-THz-384^[2],成为全球第二家推出THz焦平面成像系统的公司。2012年,北京理工大学与烟台睿创微纳技术有限公司联合开展了THz焦平面探测器理论和技术研究,并于2013年首次推出了国内首个 VO_x 的THz焦平面探测器^[3],初步实现了实时THz焦平面成像(采用 4.25 THz气体激光器对塑料箱内的刀片进行投射成像),但图像中探测器的固定图案噪声和照射的非均匀性噪声影响较为明显,距离实用化还有一定差距。

相对于目前常用的单元或多元THz探测器(如液氮制冷的Si、Ge和InSb测辐射热计、高莱探测器、肖特基二极管、场效应晶体管等^[4-6])+光机扫描成像模式,THz焦平面成像具有成像速度快、帧频高、系统结构简单、易于小型化,特别是凝视成像中无需光机扫描的特点,成为目前最有望实用化的THz成像模式之一。类比于一代光机扫描热成像和二代焦平面热成像,THz焦平面成像有望成为第二代THz成像的主要模式之一。

由于THz焦平面探测器是基于非制冷焦平面探测器工艺进行响应波段平移的,探测器的灵

敏度还不是很高,仍需要以主动式THz成像模式为主,同时考虑凝视成像对THz辐射源的功率和照明均匀性的要求。因此,THz焦平面成像系统的设计需要在THz焦平面探测器灵敏度和THz辐射源功率的限制下,结合目标场景特点进行,即一方面要满足成像所需图像信噪比的要求,使成像达到一定的对比度;另一方面还要提高检测效率,获得具有尽可能大的凝视成像检测面积。如何平衡这两方面的需求是系统设计的关键。目前,常见的可见光成像系统或红外焦平面热成像系统已具有较为成熟的性能模型和作用距离模型^[7],但相关的THz焦平面成像理论和性能模型的研究报道很少。鉴于THz焦平面成像检测模式与常规可见光成像和红外焦平面成像模式有一定的差异,本文基于THz焦平面探测器和THz辐射源的特性,建立了连续波透射THz焦平面成像理论,并根据信号及能量传输过程研究了透射式THz焦平面成像的最大面积与图像对比度模型,以为THz焦平面成像系统的设计提供理论基础和分析手段。

2 连续波透射THz成像的面积及对比度模型

如图1所示,连续波透射THz成像系统的主要过程如下:连续THz辐射源通过照明光学系统扩束后均匀地投射到被测物体的照射面上,THz辐射穿过被测物体,其透过率受物体调制,成像物

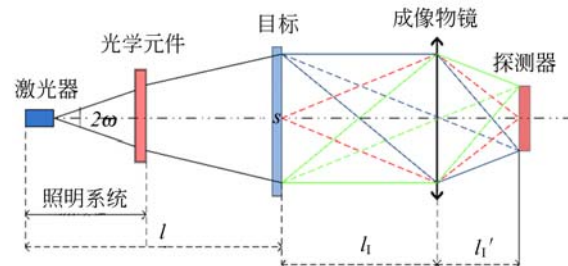


图1 连续波透射THz成像系统的组成
Fig. 1 THz CW transmission imaging System

镜将被测物体成像在 THz 焦平面探测器的光敏面上,得到被测物体的透射图像。基于焦平面探测器的 THz 连续波透射成像的理论研究和系统设计的关键是建立连续激光照射、物体与焦平面探测器之间的模型。因此,首先对 THz 成像过程的激光传输特性(衰减和分布)进行了分析。

2.1 THz 连续波透射成像系统的靶面照度

THz 焦平面成像的照明系统主要由 THz 连续波激光器及相关光学元件组成,其作用是将 THz 激光器发出的辐射通量尽可能均匀地投射到被测物体上。假设光束发射全角为 α ,被测物体为具有一定尺寸且内部存在不同介质的物体(构成目标与背景),放置在系统中轴线的垂直平面内。为了准确分析系统中能量的传输,假设 THz 激光器发出的 THz 辐射均匀照到被测物体有效区域上的比例为 δ_1 ($0 < \delta_1 \leq 1$),则被测物体照射面的辐照度为:

$$E_0 = \frac{\delta_1 \Phi}{S} \tau_1, \quad (1)$$

式中: Φ 为 THz 辐射功率; τ_1 为照明系统的光谱透射比; S 为被测物体有效照射面的面积,通过照明系统设计或调整可以控制 S 的大小; δ_1 为 S 及 THz 辐射均匀照到被测物体有效区域上的比例,在实际应用中 δ_1 受到 THz 辐射发散角、照明距离、照明系统及其光学元件的口径等的限制。

一般地,假设被测物体中目标与背景的 THz 光谱透射系数分别为 ρ_x 和 ρ_b ,在被测物体成像面的辐射符合朗伯分布,则在被测物体成像面上目标与背景的辐亮度分别为:

$$L_{0,x} = \frac{\rho_x}{\pi} E_0 = \frac{\rho_x}{\pi} \frac{\Phi}{S} \tau_1 \delta_1, \quad x = t, b. \quad (2)$$

被测物体经过物镜成像在 THz 焦平面探测器上,若已知探测器的单元尺寸为 $a \times b$,探测器规模为 $M \times N$,物镜成像的垂轴放大率为 β ,则在被测物体上的成像尺寸为 $A \times B$,其中:

$$A = M \cdot \alpha / \beta; \quad B = N \cdot b / \beta, \quad (3)$$

成像物距及成像像距分别为:

$$l_1 = (\beta - 1) f_1 / \beta; \quad l_1' = -(\beta - 1) f_1'. \quad (4)$$

根据成像系统的像面照度公式,THz 焦平面探测器上的景物辐照度为:

$$E_x = \frac{1}{4} \pi L_{0,x} \tau_i \left[\frac{D_1}{f_1'} \right]^2 \left[\frac{1 - f_1'}{l_1} \right]^2 \left[1 + \frac{1}{4} \left[\frac{D_1}{f_1'} \right]^2 \left[\frac{1 - f_1'}{l_1} \right]^2 \right] =$$

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{\Phi \tau_1 \tau_i \rho_x \delta_1 F^2}{F^2 + 4 \left[\frac{\beta - 1}{\beta} \right]^2 \left[\frac{f_1'}{1 - f_1'} \right]^2}, \quad x = t, b, \quad (5)$$

式中: f_1' 为物镜像方焦距; D_1 和 F 分别为物镜的通光孔径和 F 数, $F = D_1 / f_1'$; τ_i 为 THz 辐射在成像过程中的光谱透射率。

2.2 系统辐照度影响因素分析

在 THz 连续波成像系统的探测器光敏面上的辐照度不仅与 THz 辐射源及被测物体的特性有关,而且与照明系统在被测物体上的有效照明面尺寸以及成像过程中 THz 辐射的透射比等有密切关系。

2.2.1 THz 辐射光谱透射比的影响

2.2.1.1 大气传输的影响

大气传输对 THz 辐射的影响主要表现在对景物辐射能量、对比度以及景物细节的衰减上。由于 THz 波段水分子等具有强烈的吸收特性,THz 辐射的大气衰减主要由水蒸气的吸收引起。通常用辐射消光系数 $\mu(\lambda)$ 描述吸收和散射过程对光辐射强度的影响,也可用衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 表示,两者的换算关系为 $\alpha(\lambda) = 4.343 \mu(\lambda)$ 。根据大气衰减的朗伯定律,THz 辐射的大气光谱透射比 $\tau_a(\lambda, l)$ 为:

$$\tau_a(\lambda, l) = \exp(-\mu(\lambda) \times l) = \exp(-\alpha(\lambda) \times l / 4.343), \quad (6)$$

式中 l 为透射传输距离。

图 2 为典型的 THz 波段大气衰减系数^[8]。

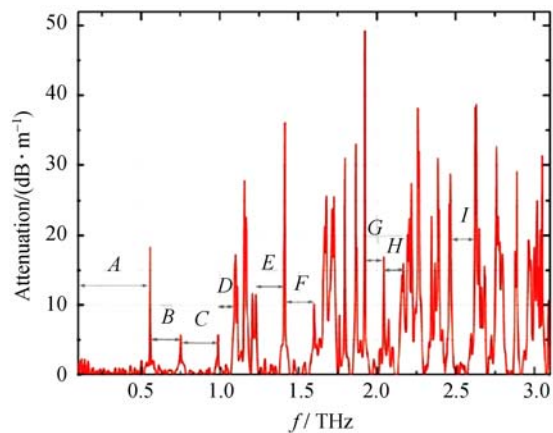
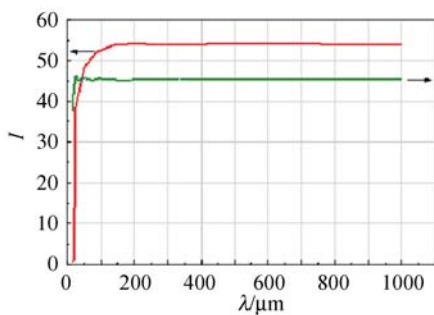


图 2 THz 波段的大气衰减系数

Fig. 2 Atmospheric attenuation coefficients in THz waveband

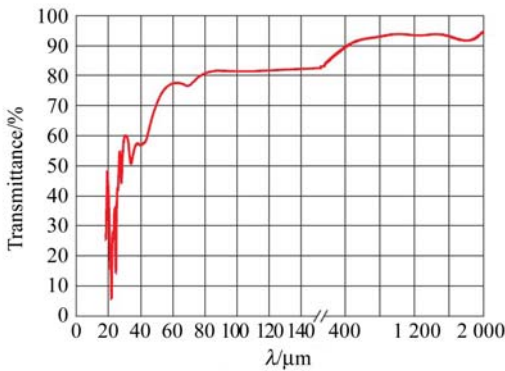
2.2.1.2 光学元件的影响

在 THz 成像系统中,不同光学元件的光谱透射比有明显的区别。目前,常用的 THz 透镜有高阻浮区硅(HRFZ-Si)透镜和 TPX 透镜(TPX 为 THz 专用材料)^[9]。图 3 给出了它们的光谱透射比。在选取光学元件时,光谱透射比不仅与元件材料和厚度等相关,而且与 THz 辐射频率相关。由于一般光学元件的口径会限制被测物体的有效照射面积,影响 THz 辐射均匀照到被测物体有效区域上的比例 δ_1 ,因此在进行系统计算时,要将 THz 的大气传输特性与光学元件的选取相结合。



(a) HRFZ-Si 透镜

(a) HRFZ-Si lens (thickness=5 mm)



(b) TPX 透镜

(b) TPX lens

图 3 不同材料透镜对 THz 的透射比

Fig. 3 Transmittance on THz of different material lenses

假设照明系统中光学元件的 THz 光谱透射比为 $\tau_1(\lambda)$,成像物镜透射比为 $\tau_2(\lambda)$,THz 辐射源到被测物体的距离为 l ,物距和像距分别为 l_1 和 l_1' ,则照明及成像过程的 THz 光谱透射率为:

$$\tau_1 = \tau_a(\lambda, l) \cdot \tau_1(\lambda) = \tau_1(\lambda) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \times l/4.343], \quad (7)$$

$$\tau_1 = \tau_a(\lambda, l') \cdot \tau_2(\lambda) =$$

$$\tau_2(\lambda) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \times (l_1 + l_1')/4.343], \quad (8)$$

式中: $l' = l_1 + l_1'$ 。

2.2.2 THz 辐射源的影响

THz 焦平面成像模式与单元扫描成像的主要区别之一为 THz 辐射源的照射面积。焦平面阵列成像需要均匀照射整个成像区域,扫描成像只需照射单元探测区域,因此,随着焦平面阵列的成像规模加大,相应的 THz 辐射功率也需要增加。换言之,目前 THz 焦平面阵列的成像区域受到 THz 激光辐射源功率的限制。

THz 焦平面成像系统获得有效成像的条件为:到达探测器的目标与背景辐射的功率差大于等于探测器的噪声等效功率(Noise Effective Power, NEP),即系统的最小可探测功率 ΔP_{\min} 满足 $|E_t - E_b| \cdot a \cdot b = \Delta P_{\min} \geq NEP$,其中 $a \times b$ 为探测器的单元尺寸。由式(5)可得,THz 辐射源的辐射功率应满足:

$$\Phi \geq \Phi_{\min} = \frac{NEP}{|\rho_a - \rho_b|} \cdot \frac{S}{ab\delta_1 F^2} \cdot \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \left[F^2 + 4 \left(\frac{\beta - 1}{\beta} \right)^2 \left(\frac{f_1'}{1 - f_1'} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

考虑到一般 THz 辐射源的照射面积 S 为圆形斑,THz 焦平面探测器为 $A \times B(4:3)$ 的矩形,如果成像圆斑正好与矩形内切,则被测物体上的最佳照明面积为:

$$S = \frac{25}{48} \pi \frac{(MN)}{\beta^2} (ab), \quad (10)$$

即 THz 辐射源的最小辐射功率为:

$$\Phi_{\min} = \frac{25}{48} \pi \cdot \frac{NEP}{|\rho_a - \rho_b|} \cdot \frac{MN}{\delta_1 F^2} \cdot \frac{1}{\tau_1 \tau_2 \beta^2} \left[F^2 + \left(\frac{\beta - 1}{\beta} \right)^2 \left(\frac{f_1'}{1 - f_1'} \right)^2 \right]. \quad (11)$$

根据 THz 辐射源的最小辐射功率和 THz 成像系统的最大垂轴放大率 β_{\max} ,可以确定可透射成像探测的区域面积 S_{\max} 。

2.3 目标与背景的对比度模型

在 THz 连续波成像的过程中,设探测器的曝光积分时间为 t ,则探测器成像单元接收的目标和背景的辐射能量为:

$$Q_r(i, j) = ab \cdot t \cdot E_r. \quad (12)$$

THz 成像系统的噪声主要来自于探测器自

身的噪声,已知探测器的 NEP,则探测器光敏面探测单元的噪声等效光能量为:

$$Q_n(i, j) = \text{NEP} \cdot t. \quad (13)$$

THz 连续波成像系统成像面上图像的表现对比度可表示为:

$$C = \left| \frac{(Q_b + Q_n) - (Q_t + Q_n)}{(Q_b + Q_n) + (Q_t + Q_n)} \right| = \left| \frac{\rho_b - \rho_t}{\rho_b + \rho_t} \right|.$$

$$\left| \frac{1}{1 + Q_n/Q_b} \right| = C_0 \left| \frac{1}{1 + \text{NEP}/(\bar{E}ab)} \right|, \quad (14)$$

式中: C_0 为目标与背景的固有对比度, $\bar{E} = (E_b + E_t)/2$ 为场景与目标照度的平均值。

3 实验分析与模型验证

3.1 器件选择及照明系统设计

本文中 THz 成像实验系统的 Easy 量子级联 (EQCL) THz 激光器和 THz 焦平面探测器的主要参数分别如表 1 和表 2 所示。成像物镜选择对 THz 辐射衰减较小的 HRFZ-Si 透镜,透镜口径 $D_0 = 50.8 \text{ mm}$, 焦距 $f = 50 \text{ mm}$, 厚度 $d = 5 \text{ mm}$, 透过率 $\tau_2(\lambda) \approx 0.55$ 。照明光学系统(如图 4)选择焦距 $f = 50 \text{ mm}$ 、镀金 90° 的离轴抛物面反射镜 (Off-axial Paraboloid, OAP), 其反射率达 90% 以上, 因此照明光学系统的透过率 $\tau_2(\lambda) \approx 1$, 调整辐射源与 OAP 的距离可改变照明系统在被测物体上的照明面积 S 。

表 1 EQCL 激光器的参数表

Tab. 1 Parameters of EQCL laser

光束发散度/ $^\circ$	中心频率/Hz	平均输出功率/mW
	4.7	1
5~35	3.9	2
FWHM	2.7	2
	1.8	0.5

表 2 THz 焦平面探测器参数

Tab. 2 Parameters of THz detector

探测器规模	响应率	像元尺寸	NEP
384×288	>10 mV/K	35 μm	<100 pW

选取中心频率 $f = 2.7 \text{ THz}$ 的辐射, 峰值功率 $\Phi = 2 \text{ mW}$, 光束发散半角 $\omega = 10^\circ$ 。由图(2)可得, THz 的衰减系数 $\alpha(\lambda) \approx 2 \text{ dB/m}$ 。假设 THz 激光器发出的辐射均匀照到被测物体的有效区

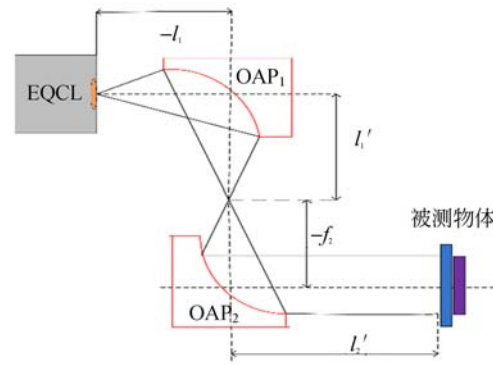


图 4 THz 照明系统

Fig. 4 Scheme of illumination system

域,且 $\delta_1 \approx 1$ 。为方便计算并不失一般性,假设照明系统中 OAP₁ 与物平面成物像关系,满足高斯公式;已知成像物镜的垂轴放大率为 β ,由式(4)及式(7)得到成像系统的 THz 光谱透过率为:

$$\tau_1 = \exp[-(l_1' - l_1) \times 2/4.343] = \exp\{[(1 - \beta)^2 f'/\beta] \times 2/4.343\}. \quad (15)$$

根据照明系统的物像关系可知:

$$l_1' = f_1' \times \left[1 - \frac{2\beta f_2' \tan(-\omega)}{\sqrt{M^2 a^2 + N^2 b^2}} \right], \quad (16)$$

$$l_1 = 1/(1/l_1' - 1/f_1'), \quad (17)$$

$$l_2 = -(l_1' + f_2'), \quad (18)$$

$$l_2' = 1/(1/l_2 + 1/f_1'). \quad (19)$$

由式(8)得照明系统的光谱透射比为:

$$\tau_1 = \exp[-2 \times (-l_1 - l_2 + l_2')/4.343]. \quad (20)$$

综上所述,照明系统及成像系统的参数均与物镜的垂轴放大率 β 有关。此外,由式(4)~式(11)可知 THz 激光器的最小辐射功率、最大照明面积和像面照度等也都为 β 的函数,即可通过改变 β 调整以上各参数。

3.2 实例分析及验证

毒品、爆炸物、金属刀具等是一般安检重点检查的对象,本文以信封中的环三亚甲基三硝铵 (RDX) 粉末以及塑料盒中的金属刀片作为被测检测物体,对图像对比度模型进行分析及验证。图 5 给出了日本 Crecia 制纸公司厚度为 0.104 mm 的纸张和塑料盒^[9]、RDX^[10] 的 THz 光谱透过率曲线。

3.2.1 信封内 RDX 粉末的探测

由图 5(a)可知, 2.7 THz 处单张纸的透过率为 96.976% , 由于已知信封是由两张纸折叠而成,故信封背景的光谱透过率 $\rho_{b1} = 94.04\%$ 。由

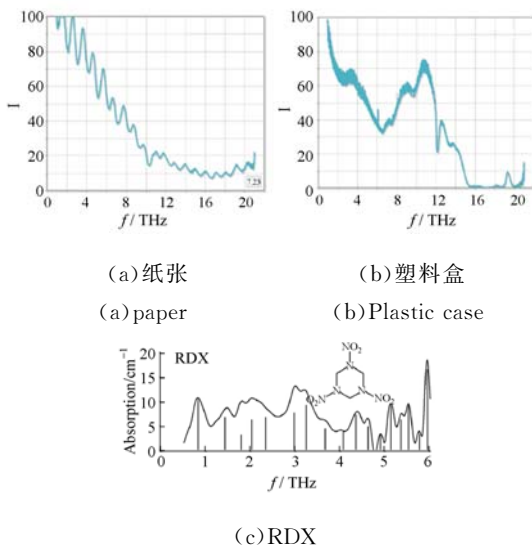


图 5 不同材料的 THz 透过率

Fig. 5 THz transmittances of different materials

图 5(c)可知,RDX 粉末在 2.7 THz 处的衰减系数约为 7.18/cm。假设粉末厚度为 2 mm,则其 THz 光谱透射比为 23.79%,因为该粉末装在信封中,故 RDX 粉末的光谱透射比 $\rho_{a1} = 22.37\%$ 。然后需要确定 THz 检测系统的成像放大率 β 和图像对比度 C 。

根据式 (11) 和式 (14),改变 β 可得到 THz 辐射源的最小辐射功率 Φ_{\min} 、被测物体照明面积 S 以及图像调制对比度与 β 的关系曲线,分别如图 6~图 8 所示。由图 6(实线)可知,当成像物镜 $-\beta = 0.2115$ 时, $\Phi_{\min} = 2$ mW,与选用的 THz 激光器性能相当,此时最大照明直径 $D \approx 7.9$ cm,面积 $S \approx 47.78$ cm²,对应的成像面积为 4.74 cm × 6.32 cm,靶面成像对比度 $C = 0.2422$ (如图 8 实线),THz 成像系统可对信封中的 RDX 进行有效的成像探测。

3.2.2 塑料盒里金属刀片的探测

由图 5(b)可知,2.7 THz 处塑料的透过率为 61%,则塑料盒的光谱透射比 $\rho_{a2} = 37.21\%$ 。金属刀片几乎不透过 THz 辐射,假设其光谱透射比 $\rho_{a2} = 0$ 。同样由图 6(虚线)可知,当成像物镜 $-\beta = 0.2850$ 时, $\Phi_{\min} = 2$ mW,最大照明直径 $D \approx 5.89$ cm(如图 7 实线),面积 $S \approx 27.71$ cm²(如图 7 虚线),对应的成像面积为 3.534 cm × 4.712 cm;图像对比度 $C \approx 0.306$ (如图 8 虚线),THz 成像系统可对塑料盒里的金属刀片进行有效的成像探测。

3.2.3 不同 THz 成像系统的对比

文献 [11] 中,MIT 采用 QCL(频率为 4.3THz,峰值功率为 50 mW)、VO_x 焦平面探测器(320 × 240,换窗口获得 THz 波段响应)、OAP($f/1 \sim 50$ mm)及 Ge 透镜($f/1 \sim 25$ mm)对信封中铅笔字进行成像,HDEP 厚片为系统提供同一场景。THz 辐射到达被测物体成像面的有效率为 0.85,成像面积约为 3 cm × 3 cm。

文献[12]中,MIT 采用远红外气体激光器(CO₂ 激光器泵浦 CH₃OH 气体,频率为 2.52 THz,功率为 10 mW,室温操作)、VO_x 焦平面探测器相机(160 × 240),OAP(焦距为 100 mm)及 Ge 透镜(焦距为 10 mm)对 FedEx 信封中的刀片进行成像,HDEP 厚片为系统提供同一场景。成像物镜的像距为 11 mm 时, β 约为 -0.1,成像面积为 4 cm × 4 cm。

本文选择器件与 MIT 有所不同,激光器辐射功率均为 mW 量级,在成像物镜像距分别为 60,67 mm, β 分别为 -0.2115 及 -0.2850,照明面积分别为 47.78 以及 27.71 cm²,成像面积分别为 4.74 cm × 6.32 cm 以及 3.534 cm × 4.712 cm 时,成像面的有效率与 MIT 的实验结果在同一量

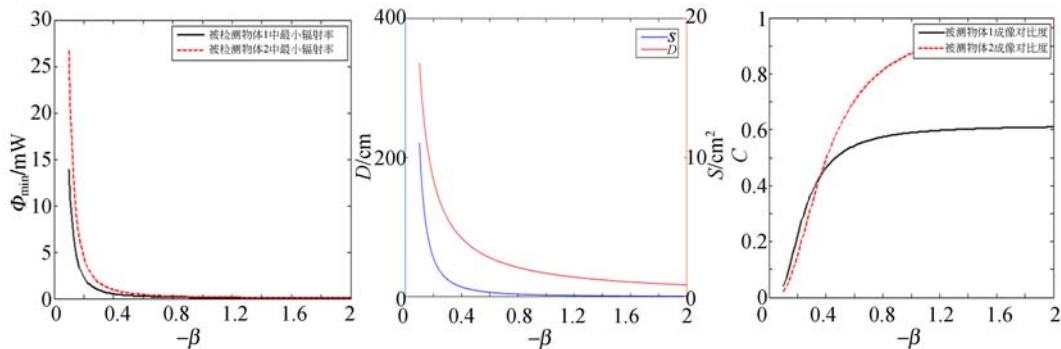


图 6 THz 辐射源 Φ_{\min} 与 β 的关系 图 7 成像面积 S, D 与 β 的关系 图 8 对比度 C 与 β 的关系

Fig. 6 Relation between β and Φ_{\min} Fig. 7 Relation between β and S, D Fig. 8 Relation between β and C

级,由此表明本文模型的合理性和有效性。

4 结 论

本文根据 THz 焦平面探测器的特性,研究分析了基于 THz 焦平面探测器的连续波透射成像的面积和图像对比度模型。通过分析连续激光照射、目标场景与焦平面探测器之间的信号传递关系,描述了成像系统中的信号传递及能量传输过程,并建立了成像面积和图像对比度模型。最后结合具体的 THz 辐射源、THz 探测器和 THz 透镜,对信封中的 RDX 粉末和塑料盒中的金属刀

片进行了 THz 成像检测,其最大成像面积分别可达 $4.74\text{ cm} \times 6.32\text{ cm}$ 、 $3.534\text{ cm} \times 4.712\text{ cm}$,图像对比度分别为 0.242 2、0.306,并与 MIT 实验系统进行了比较,验证了本文模型和方法的合理性和有效性。

目前,所提出的 THz 焦平面成像系统的 THz 辐射源功率仍然偏小,只能实现较小面积的成像,若要对更大面积的目标(例如箱包整体成像)需要采用扫描成像+图像拼接的方式。而若想实现非扫描的凝视成像,则需要更大的 THz 辐射源功率、更高的 THz 焦平面探测器灵敏度以及更有效的 THz 图像增强技术。

参考文献:

- [1] NEC Corporation. *High Sensitivity Real-Time Uncooled THz Imager and Transmission THz Microscope* [Z]. 2012.
- [2] INO IRXCAM-THz-384 CAMERA MODULE [Z]. 2013.
- [3] 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[J]. 红外技术,2013,35(4):187-194. JIN W Q, TIAN L, WANG H CH, *et al.*. Review of THz focal plane detector and the development of its imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2013,35(4):187-194. (in Chinese)
- [4] 葛新浩,吕默,钟华,等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用[J]. 红外与毫米波学报,2010,29(1):15-18. GE X H, LÜ M, ZHONG H, *et al.*. Terahertz wave reflecton imaging system based on backward wave oscillator and its application [J]. *Infrared Milim. Waves*, 2010,29(1):15-18. (in Chinese)
- [5] 郭澜涛,牧凯军,邓朝,等. 太赫兹光谱与成像技术[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):51-56. GUO L T, MU K J, DENG CH, *et al.*. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(1):51-56. (in Chinese)
- [6] 白廷柱,金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京:

作者简介:



田莉(1986—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事 THz 成像技术、光电图像处理方面的研究。Email: tianli3628612@126.com

- 北京理工大学出版社,2010:240-243. BAI T ZH, JIN W Q. *Photoelectric Imaging Principle and Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 240-243. (in Chinese)
- [7] LIU H B, ZHONG H, NICHOLAS K, *et al.*. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007,95(8):1514-1527.
- [8] Tydex. THz Materials[EB/OL]. http://www.tydex-optics.com/products/thz_optics/thz_materials/. [2015-8-6]
- [9] RIKEN, National Institute of Information and Computations Technology. THz DataBase[EB/OL]. <http://thzdb.org/index.php?s=0>. [2015-8-6]
- [10] LEAHY-HOPPA M R, FITH M J, ZHENG X, *et al.*. Osiander Wideband terahertz spectroscopy of explosive [J]. *Chemical Physics Letters*, 2007,434:227-230.
- [11] LEE A W M, WILLIAMS B S, KUMAR S, *et al.*. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13):1415-1417.
- [12] LEE A W M, HU Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19):2563-2565.

通信作者:



金伟其(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外成像技术、光电图像处理、光电检测与仪器的研究。Email: jinwq@bit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)