

实时太赫兹探测与成像技术新进展

李昕磊 李 彪

(国防科学技术大学 ATR 国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要 图像获取速率和空间分辨率一直是面向应用型太赫兹成像所要解决的关键问题。针对这一问题,学者们基于合成孔径雷达(SAR)成像技术、电磁干涉与压缩感知(CS)等理论,提出了太赫兹合成孔径成像、太赫兹干涉成像和太赫兹压缩感知成像技术,它们在成像速度和空间分辨率等方面具有良好的发展潜力。综述了上述三种方法,总结概括其各自的技术优势以及新近的研究进展。展望了太赫兹成像技术在军事、公共安全领域以及无损探伤等领域的应用前景。

关键词 成像系统;太赫兹;探测与成像;合成孔径;干涉成像;压缩感知

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090008

Review on Progress of Real-time THz Sensing and Imaging Technology

Li Xinlei Li Biao

(National Key Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The acquisition speed and spatial resolution are the key factors in application-oriented terahertz (THz) imaging systems. To solve this problem, the techniques of the THz synthetic aperture radar (SAR) imaging, THz interferometric imaging and THz compress sensing (CS) imaging have been proposed by scholars based on SAR, electromagnetic interference and CS. All of them have a good potential in imaging speed and spatial resolution. We review these techniques and summarize the technical advantages and recent research progress. The prospect of applications of THz imaging techniques in the fields of military, public safety and non-destructive defect identification is given.

Key words imaging systems; terahertz; sensing and imaging; synthetic aperture; interferometric imaging; compress sensing

OCIS codes 100.3010; 110.0110; 110.6795

1 引言

太赫兹(THz)波通常指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,位于红外和毫米波频段之间,处于宏观电子学向微观光子学的过渡范围,在电子、信息、生命、国防、航天等方面有着巨大的应用前景。THz 探测与成像是 THz 技术的重要研究领域和发展方向,也是其走向实用化最有希望的突破点之一。近年来,随着 THz 辐射产生与探测手段的不断丰富与发展,相关实验技术条件的不断完善与提高以及新的数据处理和分析理论的不引入与应用,国际上对新型 THz 探测成像系统及其相关成果的报道日益增多,并呈现出实时、紧凑、多机制的发展趋势,并且与实际应用需求相结合的特点也更加凸显。

本文首先介绍 THz 成像发展的历史过程以及其在实际应用中面临的挑战,进而综合考察近年来在实时 THz 成像领域的最新理论研究进展,综述 THz 合成孔径雷达(SAR)成像、THz 干涉成像和太赫兹压缩感知(CS)成像等技术方法,进一步展望 THz 成像技术未来的发展趋势及其在军事、国土与公共安全等领域的应用前景。

收稿日期: 2012-04-10; **收到修改稿日期**: 2012-05-15; **网络出版日期**: 2012-06-26

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 李昕磊(1987—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: xinlei-li@163.com

导师简介: 李 彪(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事精确制导与目标自动识别等方面的研究。

2 THz 成像的发展与挑战

2.1 THz 成像的发展

自 1995 年 AT&T Bell 实验室的 Hu 等^[1]报道了第一个基于光导天线的 THz 波脉冲成像系统以来, THz 成像技术受到普遍重视。THz 成像技术分类有很多种,现在主要基于 THz 源将其分为脉冲 THz 波成像和连续 THz 波成像两大类。

脉冲 THz 波成像多基于 THz 时域光谱(TDS)技术,其显著特点是信息量大,每一个成像点对应一个时域波形,因此可以从时域信号或相应的傅里叶变换谱中选择任意数据点的振幅或相位进行成像,在无损伤检测、安全检查、质量监测、病变组织检测等领域非常有应用前景。脉冲 THz 波成像显著的不足是数据获取时间较长。因此,连续 THz 波成像开始受到广泛关注。

连续 THz 波成像系统与脉冲 THz 波成像系统相比,仍采用逐点扫描方法进行成像,不同的是连续 THz 波成像系统省去了抽运-探测成像装置,所需的元件数量很少,大大减小了光学复杂性。同时系统也无需时间延迟扫描,成像速度得到了大幅提升。只是当 THz 产生源的频率一定,且只有一个探测器时,连续 THz 波成像系统只产生能量数据,不提供任何深度、频域或者时域信息,但连续 THz 波成像系统具有小型、简单、快速和价格相对低廉的优势。

2.2 THz 成像面临的挑战

1) 大气损耗和水分吸收。大气中含有的水蒸气以及其他成分分子旋转和振动能级吸收会严重衰减 THz 辐射传输,从而制约了 THz 成像系统的探测距离。此外,由于大部分生物组织中含有丰富的水分,大大降低了生物样品 THz 成像的灵敏度。

2) 辐射功率低。成像要获得高的信噪比,需要有更高功率的辐射源。目前所产生的脉冲 THz 波的平均功率只有纳瓦到微瓦数量级,连续 THz 辐射源的功率也多在毫瓦量级,难以满足实时二维(2D)成像的需求。

3) 数据获取时间长。无论是基于 THz-TDS 的脉冲成像还是连续 THz 成像,都需要采用扫描装置,成像速率难以显著提高,同时图像空间分辨率也得不到保证。

4) 图像质量仍需改善。由于 THz 波长比可见光和红外线而言要高若干量级,因此其图像空间分辨率有限。若提高图像的分辨率,信噪比将减小。

3 国内外最新研究进展

3.1 THz 合成孔径雷达成像

SAR 成像是一种高分辨率雷达成像技术,它利用脉冲压缩技术获得高的距离向分辨率,利用合成孔径原理获得高的方位向分辨率,获得大面积高分辨率雷达图像,从而可以大大提高雷达的信息获取能力,特别是战场感知能力。而对于 THz 辐射,由于其波长远小于微波、毫米波,因此更加适合于极大信号带宽和极窄天线波束的实现,有利于目标的高分辨率成像。

2008 年,比利时皇家军事学院的 Heremans 等^[2~4]将合成孔径技术引入到 THz 雷达成像中,提出了太赫兹合成孔径(SAT)技术,并从空域和频域构像对 SAT 成像技术进行了深入研究,初步分析了空域和频域构像方法在成像分辨率和运算时间上的性能特点,并且通过实验仿真数据成功重建了高分辨率的三维(3D)SAT 图像^[3]。

图 1 为 SAT 成像技术的几何示意图。

该成像理论将 SAR 成像技术与 THz 技术相结合,通过在垂直于波束方向上做二维扫描,获取高分辨率的 THz 图像,同时可获得图像的深度信息,即深度分辨率,能够重建目标场景的三维图像,因此 SAT 成像技

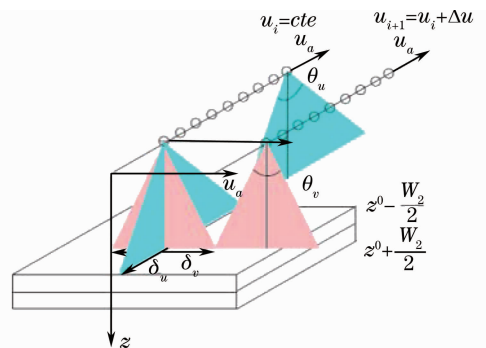


图 1 SAT 成像几何示意图

Fig. 1 Geometry of SAT imaging

术在无损伤检测和识别领域有着巨大的发展潜力。理论分析和初步实验表明,与传统时域光谱成像和扫描成像相比,利用 THz 辐射进行合成孔径成像至少具有以下优点:1) 与相同孔径传统 THz 成像系统相比,合成孔径处理可获得更高的分辨率;2) 分辨率固定,与聚焦深度无关;3) 合成孔径处理可以获得更高的信噪比和相对较快的图像获取速率。

3.2 THz 干涉合成孔径成像

THz 干涉合成孔径成像引入了射电天文学成像观测领域“孔径综合”的基本思想^[5,6],通过 THz 探测元对的干涉测量,得到不同基线上可视度函数的采样值,然后通过反演成像获得目标场景的亮温分布,即目标场图像。该方法主要有以下优点:通过若干小口径探测元组成探测阵列,干涉合成等效的大口径探测元,从而避免了高精度大口径探测元的加工困难;通过相关信号处理实现场景的瞬时成像,克服了传统 THz 成像机械扫描的困难,提高了图像获取速率。干涉合成孔径成像方法的核心是干涉阵列的配置。探测阵列一般由若干个二元干涉仪组成,如图 2 所示。当 THz 辐射的波前传播到阵列平面时,每对探测器都可以获得由彼此间距离(基线)所决定的空间傅里叶分量值,该值对应于傅里叶面(称为 $u-v$ 平面)上的一个点,称之为 $u-v$ 采样点。

干涉仪的输出称为可视度函数,它是通过对探测元接收到的信号做相关得到的。研究表明可视度函数和目标场亮温函数具有傅里叶变换的关系,因此可以通过关系式对目标场图像进行重建^[7],关系式为

$$\sigma_E(\xi, \eta) = \sum_{l=1}^{N(N-1)/2} \{ \text{Re}[A_l \exp(i\Delta\phi_l)] \cos[k(u_l\xi + v_l\eta)] - \text{Im}[A_l \exp(i\Delta\phi_l)] \sin[k(u_l\xi + v_l\eta)] \}, \quad (1)$$

式中 σ_E 为在角方向 ξ, η 上目标场的亮温分布; u_l, v_l 为基线; k 为波数; N 为探测阵列中探测元的数量。特别地对于探测元对 m, n , 电场幅度的乘积和相位的差为 $A_l = E_m E_n, \Delta\phi_l = \phi_m - \phi_n$ 。 $\xi = x'/Z_0, \eta = y'/Z_0$ 为源平面上点 (x', y') 的角坐标, Z_0 为源到探测阵列之间的距离。

对于 $u-v$ 点,其包含了整个空域图像的信息^[8],因此 $u-v$ 点越丰富,反演得到的目标场图像的细节就越好。理论上,具有 N 个探测元的阵列,其基线数量为 $N(N-1)/2$,对应的 $u-v$ 采样点的数目为 $N(N-1) + 1$ (包括一个原点)。但是由于冗余采样点的存在,实际数量比这要少,因此设计无冗余阵列对提高成像质量有很大的帮助。增加探测元对的数量可以显著增加 $u-v$ 采样点的数目,但是这无疑增加了系统的硬件成本。射电天文领域通常采用“地球旋转综合”来增加 $u-v$ 采样点^[5],在 THz 干涉合成孔径成像系统中,同样也可以通过旋转探测阵列来增加 $u-v$ 点的数量^[9,10]。

Federici 等^[11]报道了一种基于电磁波干涉的 THz 成像系统,该系统利用两个红外波段的外腔二极管激光器(ECDL)通过光混频产生连续 THz 波作为辐射源和探测源,如图 3(a)所示。在探测阵列部分,由于探测元所需功率输入较小,因此可以用光纤分光器将来自于一组激光器差频输出的 THz 波细分到不同的探测

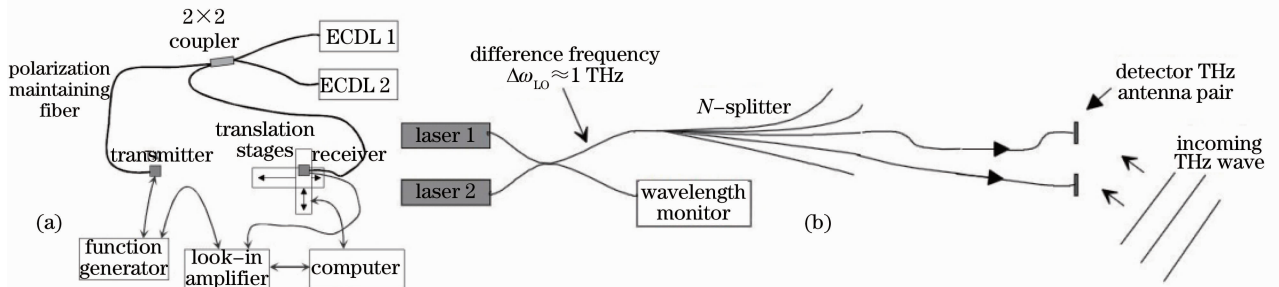


图 3 基于电磁波干涉的 THz 成像系统。(a) 系统示意图; (b) 探测阵列结构示意图

Fig. 3 THz interferometric imaging system setup. (a) Schematic of the system; (b) sketch of the array configuration

元上,如图 3(b)所示。图 4 给出了系统对“NJIT”标识的成像结果,其中成像距离为 25 m,探测阵列呈圆形,探测元数目分别为 49、100 和 200。可以看出,随着探测元数目的增加,所获取的图像也相应地趋于清晰。这和理论分析是一致的,即探测元的增加会相应地增加空间傅里叶分量的数目,进而提高图像的分辨率,降低重建图像的畸变。

此方法将天文观测领域的电磁干涉成像方法引入 THz 成像领域,通过阵列稀疏、相关接收等技术,有效地解决了传统 THz 成像技术中探测元口径有限、机械扫描困难等问题,从而大大提高了观测的空间分辨率,有效地提高了图像获取速率。理论研究和实验表明,采用有限探测元可以获得质量较好的 THz 图像。

3.3 THz 压缩感知成像

CS 理论是近年来兴起的信号分析理论,它利用随机测量矩阵可以把一个稀疏(或可压缩)的高维信号投影到低维(相对于高维)的空间上,并利用信号的稀疏性(或可压缩性)先验条件,通过一定的线性或非线性的解码模型,以很高的概率重建原始信号。与传统奈奎斯特定理不同,在 CS 理论框架下,只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的,那么就可通过求解一个优化问题从少量的投影中高概率地重构出原信号。

Chan 等^[12]对 CS 这种新型的信号处理理论在 THz 成像探测系统设计中的应用进行了探索性研究,通过对傅里叶变换系数矩阵进行稀疏采样,并结合经典的相位补偿方法,能够以比传统方法更少数目的特征进行图像重建,证实了 CS 理论在 THz 成像处理中的发展潜力。

图 5 给出了 Chan 等^[12]报道的成像系统示意图。图 6 给出了该系统对 34 mm × 31 mm 大小、中间带有“R”型孔的目标的成像结果,其中图 6(a)为 4096 pixel 全像素采样重建的结果,图 6(b)为 500 pixel 采样重建的结果,图 6(c)是具有相位补偿的 500 pixel 采样重建图。图 7 为相应的相位信息图,其中图 7(a)为 4096 pixel 全像素采样重建的结果,图 7(b)为 500 pixel 采样重建的结果图,图 7(c)为具有相位补偿的 500 pixel 采样重建图。

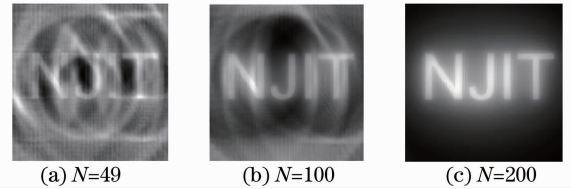


图 4 不同数目探测元成像阵列干涉成像结果
Fig. 4 Reconstruction image of the interferometric array with different detectors numbers

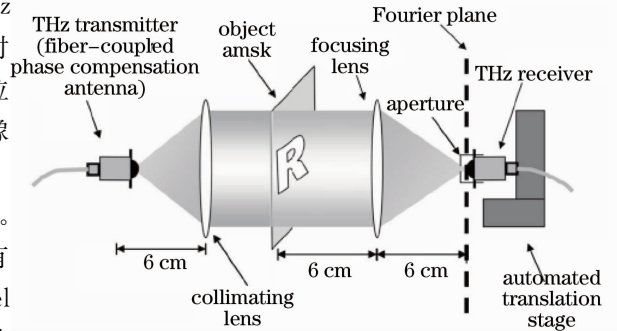


图 5 基于 CS 理论的 THz 成像处理系统示意图
Fig. 5 THz CS imaging setup

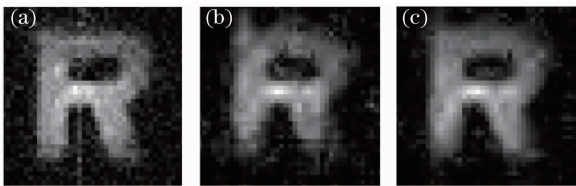


图 6 不同像素采样条件下压缩感知成像结果(幅度图)。
(a) 4096 pixel; (b) 500 pixel; (c) 500 pixel+相位补偿

Fig. 6 CS imaging results (magnitude). (a) 4096 pixel; (b) 500 pixel; (c) 500 pixel+phase compensation

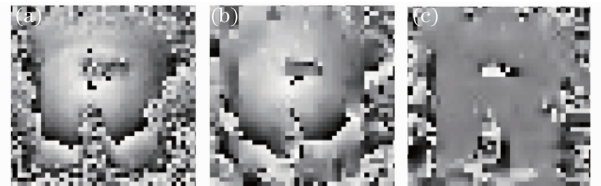


图 7 不同像素采样条件下压缩感知成像结果(相位图)。
(a) 4096 pixel; (b) 500 pixel; (c) 500 pixel+相位补偿

Fig. 7 CS imaging results (phase). (a) 4096 pixel; (b) 500 pixel; (c) 500 pixel+phase compensation

虽然 CS 方法相比传统 THz 成像方法在成像速度上有了很大的提高,但是其成像速度依然受扫描速度的限制。为此 Chan 等^[13]对系统进行了改进,采用空域随机模板调制机制,有效提高了成像速度,但因需要在成像系统中增加空域调制模块,增加了系统复杂度。韩国先进科技学院的 Lee 等^[14]报道了基于相干光学计算的 THz CS 成像方法,并取得了较好的实验结果。Xu 等^[15]提出了基于单频段的 CS 成像方法和 THz 脉冲的多频性方法,结合相位和幅度空间分布的先验信息、空域稀疏性、光谱相位信息和整个光谱的相关性,有效提高了成像的质量。Hwang 等^[16]在总结前人成果的基础上提出了一种快速的基于块的 THz 空域 CS

成像方法,并取得了理想的实验结果。在国内,首都师范大学的赵亚芹等^[17]也对 THz CS 成像进行了初步的研究,其采用连续 THz 波源返波振荡器(BWO)来进行实验,并得到了初步实验结果。

作为一种新型的数据分析处理理论,CS 是一个充分利用信号稀疏性或可压缩性的全新信号采集、编解码理论,在提高 THz 成像数据获取能力方面具有良好的发展前景。但是其理论研究还有待进一步完善,相应的应用研究也才处于起步阶段,有很多现实问题需要解决,如:1)快速有效的稀疏分解算法的研究;2)便于硬件实现和优化算法实现的测量矩阵的设计;3)寻找一种构造稳定、计算复杂度较低、对观测数量要求较少的重构算法;4)对于稳定的重构算法,是否存在最优的确定性观测矩阵。但是相信随着相关理论的进一步发展,该项技术有可能在实用化方面取得更大的突破。

4 总结与展望

THz 成像技术是一个非常重要的交叉前沿领域,给技术创新、国民经济发展和国家安全等方面的应用提供了很好的选择。

由于 THz 技术潜在的优势,其在军事领域有巨大的应用价值。THz 波所处频段避开了传统隐身材料的吸收频段,有利于隐身目标的探测,因此,THz 频段必将成为雷达成像领域极具研究和开发价值的新频率资源。而将 THz 成像系统与无人机系统相结合,也有望实现在战场对敌隐蔽武器系统和人员的探测与识别,并且对于无人机电 THz 成像系统已有初步的研究和论证^[18]。

在公共安全领域,由于 THz 成像可以有效地分辨爆炸物、生化制剂以及枪支刀具等危险物品,并且其光子能量低,不会对人体健康造成影响,因此可作为传统安检手段(如 X 光检测仪、拱形安全检测门和手持金属探测器等)有力的补充,用以对危险物体和目标的预警和识别。用于警方车载巡逻系统,可及时发现人群中携带危险武器者。

THz 成像技术为无损探伤提供了新的技术途径。相对于传统探测技术,其可以探测更为细小的目标,定位更加精确,特别是 SAT 技术更可对目标进行三维立体成像,因此可精确确定损伤位置。该技术是对传统无损探伤技术的有力补充。

THz 成像技术发展至今只有十几年的时间,总体来看,多数应用还处在实验室阶段,真正的大规模实用化应用还没有开始。实用化的 THz 成像系统必须满足实时性、高灵敏度、高分辨率、高稳定性、低成本和便携性等要求,而成像速度和空间分辨率是制约 THz 成像系统走向实用化的主要因素。本文所综述的方法在很大程度上克服了传统 THz 成像方法数据获取速率慢、系统结构复杂等缺点,提供了快速 THz 成像的新理论新途径,为 THz 技术的发展与应用提供了更为广阔的发展空间。随着科学技术的进步和关键领域的技术突破,相信在不久的将来,THz 成像技术将走出实验室,走向实用化,并大大扩展其应用领域。

参 考 文 献

- 1 B. B. Hu, M. C. Nuss. Imaging with terahertz waves[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(16): 1716~1718
- 2 Roel Heremans, Marijke Vandewal, Marc Acheroy. Synthetic aperture imaging extended towards novel THz sensors[C]. Proceedings of the IEEE Sensors 2008 Conference, 2008, 438~441
- 3 Marijke Vandewal, Roel Heremans, Marc Acheroy *et al.*. Synthetic aperture signal processing for high resolution 3D image reconstruction in the THz-domain[C]. Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2009
- 4 Roel Heremans, Marijke Vandewal, Marc Acheroy. Space-time versus frequency domain signal processing for 3D THz imaging[C]. Proceedings of the IEEE Sensors 2009, Conference, 2009, 739~744
- 5 A. R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson Jr.. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[M]. New York: Wiley, 2002. 1~120
- 6 D. M. Le Vine. Synthetic aperture radiometer systems[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(12): 2228~2236
- 7 A. M. Sinyukov, Andrei Stepanov, Brian Schulkin *et al.*. Terahertz interferometric and synthetic aperture imaging [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2007, **17**(2): 431~443
- 8 Ji Wu, Hao Liu, Jingye Yan *et al.*. Interferometric Imaging Technology for Microwave Radiometers. In P. Imperatore, D. Riccio (eds.) Geoscience and Remote Sensing New Achievements [M]. Rijeka: InTech, 2010

- 9 J. F. Federici, Dale Gary, Brian Schulkin *et al.*. Terahertz imaging using an interferometric array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(12): 2477~2479
- 10 K. Su, Z. Liu, Robert B. Barat *et al.*. Two-dimensional interferometric and synthetic aperture imaging with a hybrid terahertz/millimeter wave system[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(19): E13~E19
- 11 John F. Federici, Dale Gary, Robert Barat *et al.*. Detection of Explosives by Terahertz Imaging. In J. Yinon (ed.) counterterrorist Detection Techniques of Explosives[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007. 323~366
- 12 Wai Lam Chan, Matthew L. Moravec, Richard G. Baraniuk *et al.*. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 974~976
- 13 Wai Lam Chan, Kriti Charan, Dharmpal Takhar *et al.*. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(12): 121105
- 14 Kanghee Lee, Kyung Hwan Jin, Jong Chul Ye *et al.*. Coherent optical computing for T-ray imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 508~510
- 15 Zhimin Xu, Edmund Y. Lam. Image reconstruction using spectroscopic and hyperspectral information for compressive terahertz imaging[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(7): 1638~1646
- 16 B. Hwang, Sang Hun Lee, Woo-Taek Lim *et al.*. A fast spatial-domain terahertz imaging using block-based compressed sensing[J]. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, **32**(11): 1328~1336
- 17 Zhao Yaqin, Zhang Liangliang, Zhu Dechong *et al.*. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111003
赵亚芹, 张亮亮, 祝德充 等. 基于压缩传感的单点太赫兹成像[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s111003
- 18 Lin Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2010, **8**(4): 373~377
林 华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, **8**(4): 373~377