

文章编号: 2095-4980(2013)05-0670-06

基于 Simulink 的太赫兹 SAR 成像算法仿真

杨 琪, 邓 彬, 王宏强, 秦玉亮, 丁文霞

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 高分辨成像是合成孔径雷达的主要功能之一。为对即将搭建的某多频段复用太赫兹雷达成像系统进行验证,以距离徙动算法为例,用 Matlab/Simulink 对一个载频 675 GHz、带宽 20 GHz 的太赫兹雷达系统进行了二维成像仿真,设计了基于 Simulink 的回波生成、距离压缩和快速傅里叶变换等模块,得到了高分辨率的目标二维像。仿真结果与设计的目标和场景一致,验证了仿真系统的正确性。最后对仿真结果存在问题进行了改进和分析。

关键词: Simulink; 太赫兹; 距离徙动算法; 高分辨成像

中图分类号: TN957.52; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201305.0670

Simulation of a terahertz-SAR imaging algorithm based on Simulink

YANG Qi, DENG Bin, WANG Hong-qiang, QIN Yu-liang, DING Wen-xia

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: High resolution imaging is one of the main functions of Synthetic Aperture Radar(SAR). In order to validate a multiband terahertz radar imaging system which is going to be set up, this paper takes the Range Migration Algorithm(RMA) as an example, and presents a 2-D imaging simulation of a terahertz radar system with the carrier frequency of 675 GHz and the bandwidth of 20 GHz by Matlab/Simulink. Then the modules of echo generation, Range Compression, and Fast Fourier Transform(FFT) are designed based on Simulink and the high resolution 2-D images are obtained. The simulation results are consistent with the assumed targets and scenes, which verifies the validity of the simulation system. In the end, the improvement and analysis on the problems occurring in the simulation results are performed.

Key words: Simulink; terahertz; Range Migration Algorithm; high resolution imaging

太赫兹(Terahertz, THz)波通常指频率在 0.1 THz~10 THz(对应波长 30 μm ~3 mm)之间的电磁波,其频率介于毫米波与红外光之间,处于宏观电子学向微观光子学的过渡频段,在电磁波谱中占有很特殊的位置,具有与其他波段不同的特殊性质。20 世纪 80 年代以前,由于认识手段特别是太赫兹源的限制,人们对这个频段的特性知之甚少,形成了所谓的“太赫兹空隙”。近年来,随着太赫兹源、检测和相关器件的突破,太赫兹波一系列优越性能得以发现,显示出巨大的潜在应用前景^[1-2]。太赫兹合成孔径雷达(THz-Synthetic Aperture Radar, THz-SAR)是太赫兹军事应用的重要部分,而超高分辨力成像是太赫兹 SAR 的最大优势。由于太赫兹雷达载频极高,对应信号波长很小,可以达到很高的方位向分辨力,同时由于太赫兹雷达更易于实现大带宽,可以达到很高的距离分辨力,因此太赫兹雷达在高分辨成像方面具有独特优势,引起了广泛关注和深入研究^[3-5]。未来信息化战争对作战双方战场监视和情报收集能力提出了更高要求,太赫兹雷达可以搭载在直升机或者无人机上对战场进行高精度度监视,此外太赫兹波良好的穿透性可以使其对遮蔽目标,如伪装网下的装备、树丛中的装甲车等进行成像,或者穿透沙尘烟雾进行成像,有望成为反隐身的军事武器^[6]。因此太赫兹 SAR 成像的研究具有重要的军事意义。

目前,国内外太赫兹 SAR 的研究还处于实验室阶段。国外公开报道的太赫兹雷达成像系统主要有:美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的 675 GHz 雷达系统^[7],该雷达带宽 30 GHz,采用调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)体制,能达到毫米级的距离分辨力;德国应用科学研究所高频物理与雷达技术实验室研制的 220 GHz COBRA 成像系统^[8],工作频率 220 GHz,采用 LFM CW 体制,脉宽 120 ms,扫描带宽为 8 GHz,功率为 20 mW,在 200 m 距离上实现了 1.8 cm 的距离分辨力;以色列撒玛利亚 Ariel 大学的

收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(No. 61171133); 青年科学基金资助项目(No. 61101182)

330 GHz 线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)成像雷达^[9]和瑞典的 210 GHz 成像实验雷达^[10]等。国内方面,目前能够实现成像的太赫兹雷达系统主要有中国工程物理研究院自主研制的国内首个 0.14 THz 逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)系统^[4]、中科院电子所设计的 0.2 THz 聚焦波束扫描成像系统^[11]和首都师范大学与北京理工大学合作设计的 0.2 THz 步进频雷达系统(只能实现一维距离像)等,此外国防科技大学在建的五段分频复用太赫兹雷达试验系统也将进行高分辨 SAR/ISAR 成像试验。

综上所述,目前国内外特别是国内在太赫兹成像领域的研究还远远不够深入,离实际使用还有很大差距,因此,进行这方面的研究很有必要。

1 距离迁徙算法简介

SAR 中的距离徙动算法(RMA),又称波数域算法(Wavenumber Domain Algorithm)或 $w-k$ 算法,最初由 C Cafforio 等人借鉴地球物理勘探数据处理中的“地震波迁移技术”,根据均匀介质中的电磁波传播方程提出。RMA 是在波束域实现场景图像的重建,是一种严格的匹配算法,也是 SAR 成像的最优实现。在 RMA 中,首先以雷达发射信号的复包络为参考信号对接收信号进行距离向匹配滤波,通常称之为“距离压缩(Range Compression, RC)”过程,通过距离压缩,参考距离处的目标得到了良好的聚焦。然后对距离压缩信号的二维频谱进行 Stolt 插值,可看做距离频域上的变量替换,主要是为了完成残余距离单元徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)、残余二次距离压缩(Secondary Range Compression, SRC)和残余方位压缩。然后进行二维逆傅里叶变换,就可以得到二维 Sinc 脉冲的叠加,此即 SAR 图像。RMA 的算法流程见图 1。

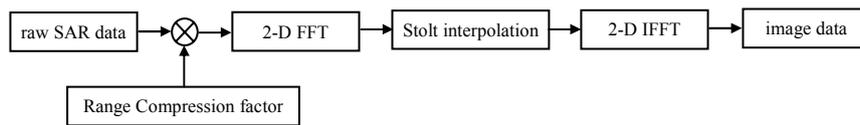


Fig.1 Block diagram of RMA
图 1 RMA 算法流程图

本文仿真假设为正侧视 SAR,目标为一个 5×5 的理想散射点阵,中心距离 1 000 m,距离间隔为 8 m,方位间隔为 2 m,场景大小为 50 m×16 m。正侧视 SAR 的 RMA 成像几何和本文仿真设计的目标场景分别见图 2 和图 3,具体的仿真参数见表 1。

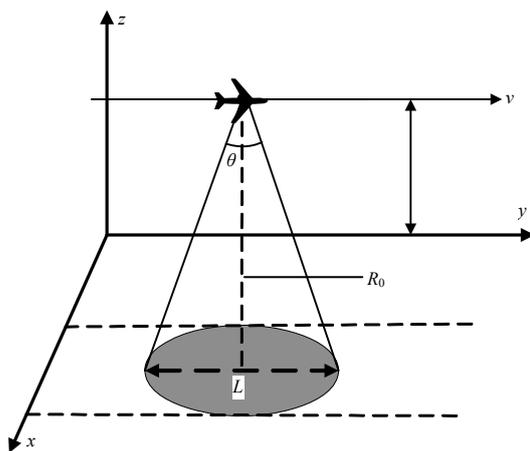


Fig.2 THz radar system schematic
图 2 SAR 成像几何

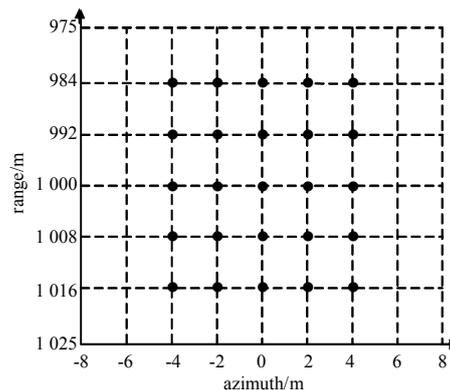


Fig.3 Diagram of targets
图 3 目标场景示意图

表 1 仿真参数表
Table1 Simulation parameters

carrier frequency f_c/GHz	bandwidth B/GHz	impulse width $T_p/\mu\text{s}$	reference range R_{ref}/m	synthetic aperture velocity $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	synthetic aperture length L/m	range sample interval $\Delta r/\text{m}$	azimuth sample interval $\Delta x/\text{m}$
675	20	30	1 000	100	30	50/1 024	16/1 024

根据表 1 的参数,可以估算出成像的距离分辨率 ρ_r 和方位分辨率 ρ_a 分别为:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} = 0.0075 \text{ m} \tag{1}$$

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\theta} \approx \frac{cR_{ref}}{2f_c L} = 0.0075 \text{ m} \quad (2)$$

式中： c 为光速； λ 为波长； θ 为波束宽度。可以看出，由于太赫兹 SAR 的载频高，带宽大，理论上能够实现毫米级的高分辨成像。

2 基于 RMA 的太赫兹雷达 Simulink 模块设计

Mathworks 公司开发的 Simulink 是功能最强大的仿真软件之一，在仿真领域具有很多十分突出的优势。首先，Simulink 提供了一个丰富的模块库，涉及航空航天、控制系统、信号处理等各个领域，用户只需鼠标拖动就能完成非常复杂的仿真；其次，Simulink 提供了方便的图像输出界面，与一般程序仿真相比更为直观，可用于实现各种动态系统的建模、分析与仿真；最后，与 Matlab 最大的不同之处在于，Simulink 是基于时间流的仿真，更有利于对实时系统进行仿真。由于太赫兹 SAR 成像只需要较短的合成孔径时间，因此将 Simulink 应用于太赫兹成像中，只要算法效率足够高，就能实时显示成像结果。因此本文选择 Simulink 作为太赫兹 SAR 成像仿真工具。

按照上述 RMA 的算法流程图，开发了太赫兹雷达 RMA 成像的 Simulink 仿真系统。

2.1 回波生成模块

由于 Simulink 是基于时间流的仿真，根据表 1 中的参数可以推算出只需 0.3 s 即可成像，故设置仿真时间为 0.3 s，时间采样为 1 024。通过一个矩阵来获取目标位置，并计算各个时间点相应目标位置处的回波延时，得到各个目标的回波后进行叠加即可得到各时间点的回波信号。该模块的 Simulink 示意图见图 4。

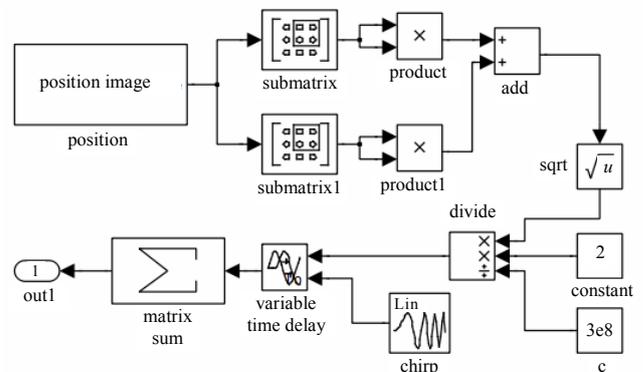


Fig.4 Echo generation module
图 4 回波生成模块

2.2 距离压缩模块

设发射的 LFM 复数形式为：

$$p(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} K t^2\right)\right] \quad (3)$$

式中 K 为调频斜率， $K=B/T_p$ 。

采用去调频(Dechirp)接收方式，这也是太赫兹雷达常用的一种接收体制。距离雷达 R 处的单位 RCS 理想点目标的回波信号 $s(t)$ 和参考距离 R_{ref} 处的回波信号 $s_{ref}(t)$ 分别为：

$$s(t) = p(t - \tau) = \text{rect}\left[\frac{t - \tau}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t - \tau) + \frac{1}{2} K(t - \tau)^2\right]\right\} \quad (4)$$

$$s_{ref}(t) = p(t - \tau_{ref}) = \text{rect}\left[\frac{t - \tau_{ref}}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t - \tau_{ref}) + \frac{1}{2} K(t - \tau_{ref})^2\right]\right\} \quad (5)$$

式中：回波延时为 $\tau=2R/c$ ；参考点延时为 $\tau_{ref}=2R_{ref}/c$ 。在 Dechirp 方式下，以 $s_{ref}(t)$ 为参考信号对 $s(t)$ 进行匹配滤波即可完成距离压缩，即：

$$s_{RC}(t) = s(t) \times s_{ref}^*(t) \quad (6)$$

具体 Simulink 模块见图 5。

2.3 快速傅里叶变换模块

快速傅里叶变换(FFT)是信号处理中最常用的操作之一，在 Simulink 中有相对应的 FFT 模块。但是在成像过程中，为了将零频分量移至频谱中心位置，需要在 FFT 操作的前后分别进行一次 fftshift 操作，其原理就是一个简单矩阵拆分与重组。在实际过程中，矩阵和向量的 fftshift 略有不同，矩阵的 fftshift 见图 6，向量的 fftshift 与之类似。

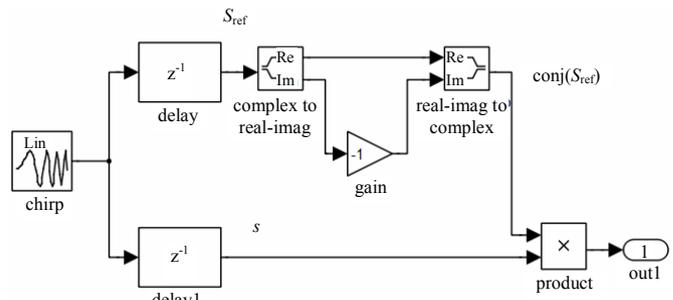


Fig.5 Range Compression module
图 5 距离压缩模块

2.4 Stolt 插值模块

Stolt 插值是 RMA 成像的重要步骤，其实质是距离频域上的一次变量替换操作，即：

$$k_t \rightarrow k_r : k_r = \sqrt{(k_t + k_c)^2 - k_x^2} - k_c \tag{7}$$

式中 k_c 和 k_t 分别是载频 f_c 和基频 f_t 的波数域表达式，Stolt 插值就是在 (k_x, k_t) 进行的。其 Simulink 示意图见图 7。

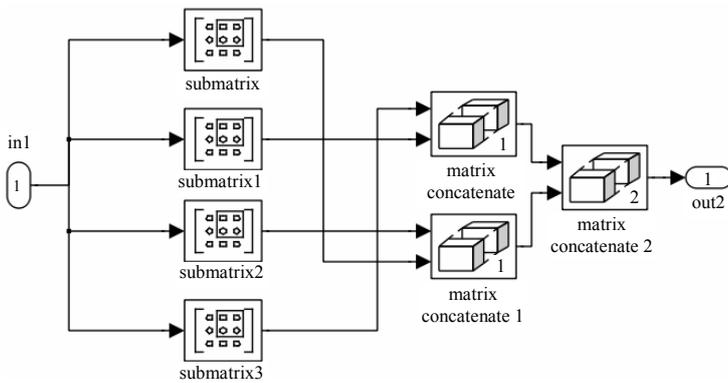


Fig.6 Fftshift module
图 6 Fftshift 模块

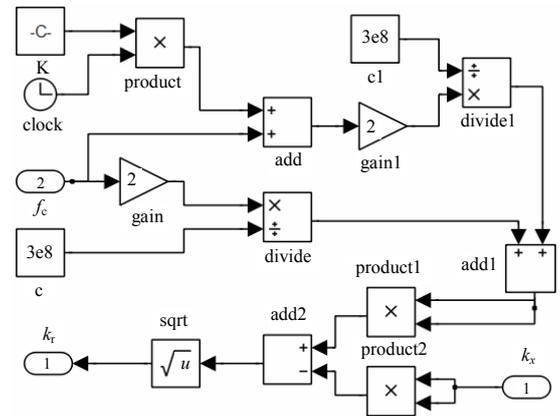
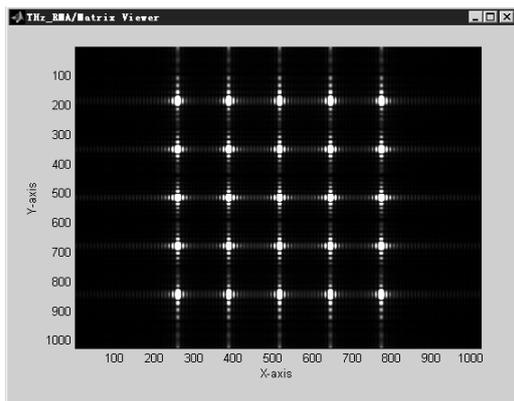


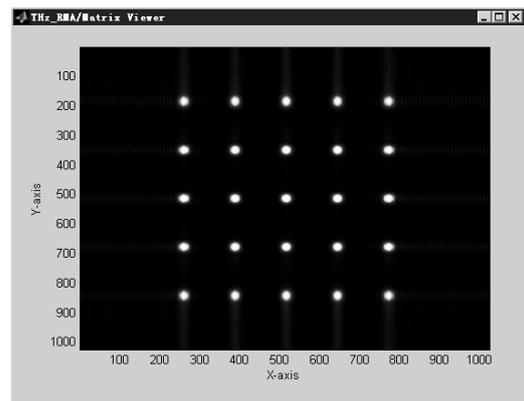
Fig.7 Stolt interpolation module
图 7 Stolt 插值模块

3 仿真结果与分析

根据图 1 的算法流程，结合第 2 节中各模块的设计，对太赫兹 SAR 的 RMA 成像进行了仿真，得到的成像结果见图 8(a)。通过图 8(a)和图 3 的比较发现，所得图像与设置的目标比较吻合，在预设目标位置处有一个亮点。但是由于压缩后 Sinc 函数的旁瓣较高，使得点阵目标的成像结果类似于网格状。为了解决这一问题，得到更好的图像，本文在距离压缩和方位压缩的过程中分别进行了加窗处理，根据频域加窗抑制时域旁瓣的原理来进一步分离各个目标点。通过多次仿真比较发现，在距离压缩时采用 Hamming 窗，方位压缩时采用 Kaiser 窗效果较好。结果见图 8(b)。分别取图 8(a)和图 8(b)的中心点目标进行分析，画出了它在方位和距离向上的剖面图，见图 9(a)和图 9(b)。比较图 8 和图 9 发现，经过加窗，Sinc 函数旁瓣得到明显抑制，各个点目标分开，形成较为理想的点阵，但是加窗也使得主瓣展宽，降低了分辨力，在太赫兹成像中，这个分辨力的降低是可以接受的。



(a) image result(without window)



(b) image result(with window)

Fig.8 Image results
图 8 成像结果

4 结论

综上所述，Simulink 可以对太赫兹 SAR 成像进行很好的仿真，这对成像算法的优化设计和试验系统搭建过程中器件选型具有重要的指导意义。本文通过 RMA 算法的 Simulink 实现，验证了太赫兹雷达高分辨成像的优势，得到了较为理想的结果图，并对得到的结果进行改进，使其更好地符合预设目标。但是，在仿真中由于算法效率、采样率以及仿真时间的限制，没有发挥出 Simulink 基于时间流仿真的优势，此外，本文只是对理想情况进行仿

真, 没有考虑杂波和系统噪声的干扰, 没有考虑运动目标的运动。这方面也是下一步工作的重点。

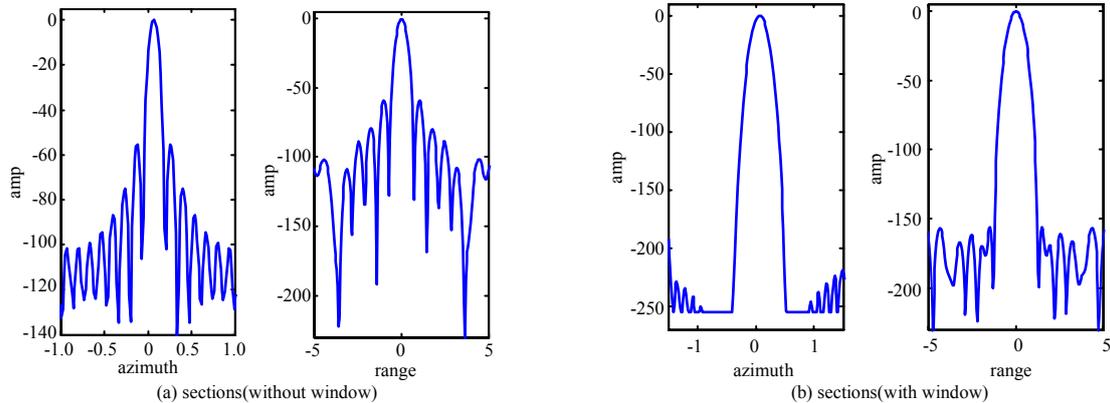


Fig.9 Central target sections
图 9 中心点目标剖面图

参考文献:

- [1] 杨光鲲,袁斌,谢东彦,等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011,41(4):376-380. (YANG Guangkun, YUAN Bin,XIE Dongyan,et al. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. Laser & Infrared, 2011,41(4):376-380.)
- [2] 朱彬,陈彦,邓科,等. 太赫兹科学技术及其应用[J]. 成都大学学报:自然科学版, 2008,27(4):304-307. (ZHU Bin,CHEN Yan,DENG Ke,et al. Terahertz Science and Technology and Its Applications[J]. Journal of Chengdu University:Natural Science Edition, 2008,27(4):304-307.)
- [3] 张振伟,崔伟丽,张岩,等. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006,25(3):217-220. (ZHANG Zhenwei, CUI Weili,ZHANG Yan,et al. Terahertz Time-domain Spectroscopy Imaging[J]. J. Infrared Millim.Waves, 2006,25(3): 217-220.)
- [4] 蔡英武,杨陈,曾耿华,等. 太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(1):7-9. (CAI Yingwu, YANG Chen,ZENG Genghua,et al. Experimental research on high resolution terahertz radar imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7-9.)
- [5] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-198. (LIANG Meiyuan, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-198.)
- [6] 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):373-377,382. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):373-377,382.)
- [7] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N,et al. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):169-182.
- [8] Essen H,Wahlen A,Sommeretal R,et al. Development of a 220-GHz Experimental Radar[C]// 2008 German Microwave Conference. Hamburg Harburg:[s.n.], 2008:1-4.
- [9] Arusi Ruth,Pinhasi Yoser,Kapilevitch Boris,et al. Linear FM radar operating in the Terahertz regime for concealed objects detection[C]// 2009 IEEE International Conference on Microwaves. Tel Aviv:[s.n.], 2009:1-4.
- [10] Svidin Jan,Rudner Staffan,Thordarsson Gunnar,et al. An experimental 210 GHz radar system for 3-D stand-off detection[C]// IRMMW-THz 2010 35th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves. Rome:[s.n.], 2010:1-2.
- [11] 高翔,李超,谷胜明. 0.2 THz 聚焦波束扫描成像系统的设计[C]// 第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会. 四川绵阳:[s.n.], 2012:591-596.