

太赫兹孔径编码成像研究综述

邓彬, 陈硕, 罗成高*, 秦玉亮, 王宏强, 黎湘

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:太赫兹孔径编码成像借鉴了光学孔径编码成像和微波关联成像的基本原理,通过反射式天线等技术改变目标区域太赫兹波等效空间幅相分布来实现高分辨成像,具有高帧率、高分辨、前视凝视等诸多优势,是太赫兹雷达的重要发展趋势之一.介绍了太赫兹孔径编码成像提出的背景,系统阐述了其原理、现状、实现方式、关键问题,指出了其在末制导、安检反恐等领域广阔的应用前景,以期为推动太赫兹孔径编码成像和新体制太赫兹雷达研究提供一定的借鉴.

关键词:太赫兹雷达;成像;孔径编码;成像雷达先进扫描技术

中图分类号:TN95 **文献标识码:**A

Review of Terahertz coded-aperture imaging

DENG Bin, CHEN Shuo, LUO Cheng-Gao*, QIN Yu-Liang, WANG Hong-Qiang, LI Xiang
(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Terahertz coded-aperture imaging is a novel imaging technique which follows the basic principles of optical coded-aperture imaging and microwave coincidence imaging. It is based on the modulation of the effective terahertz-wave spatial distribution, either amplitude or phase, over the illuminated area. The wave spatial distribution or illumination pattern is usually obtained by a reflecting antenna. Terahertz coded-aperture imaging has some significant advantages such as high frame rate, high resolution, and the ability of forward looking and staring imaging. Hence it has been regarded as one of the most important development trends of terahertz radars. In this paper, we at first introduce the proposition background of this new technique, and then expound its principles, research states of the art, an implementable setup and the key problems. Finally, the application fields including missile terminal seeking and security as well as anti-terrorism are discussed. We hope that this paper can provide some positive guidance for the study of terahertz coded-aperture imaging and the corresponding new terahertz radar.

Key words: imaging, coded aperture, advanced scanning technology for imaging radars (ASTIR)

PACS: 07.57.-c

引言

雷达成像技术作为一种全天时、全天候、远距离的信息获取手段,在空间监视、对地观测、精确制导、安检反恐等军事和民用领域有着非常重要的应用,已成为诸多国家竞相发展的关键技术之一.经过数十年的发展,雷达高分辨成像理论与技术已取得长

足进步,部分成果已应用到实际系统中.尽管成像方法林林总总,但通常都是基于层析和距离-多普勒原理,并通过目标和雷达相对运动形成的虚拟合成孔径实现^[1].客观地说,这一原理在雷达探测领域获得了极大的成功.但是,在需要前视或凝视成像的应用场景中,如导弹末制导,雷达与目标间的相对运动转角很小,无法满足合成孔径雷达(Synthetic Aper-

收稿日期:2016-03-10,修回日期:2016-12-06

Received date: 2016-03-10, revised date: 2016-12-06

基金项目:国家自然科学基金(61302148,61571011);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20134307120024)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61571011, 61302148); Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20134307120024)

作者简介(Biography): 邓彬(1981-),男,山东邹城人,副研究员,博士学位,主要研究领域为太赫兹雷达、合成孔径雷达. E-mail: dengbin@nudt.edu.cn

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

ture Radar, SAR) 或逆合成孔径雷达 (Inverse SAR, ISAR) 成像所需的大虚拟孔径条件, 无法凝视成像; 在需要高帧率成像应用场景中, 如对成像实时性要求较高的察打一体无人机和站开式安检, 成像所必须的积累或扫描时间严重制约着雷达应用. 尽管实孔径阵列可以通过单个脉冲“快拍”成像, 但仍基于孔径合成思想且阵列规模庞大. 破解“高分辨高帧率凝视成像”这一难题亟需雷达成像原理、体制和方法的突破.

利用孔径编码技术, 仅通过单个收发通道配合编码天线 (反射式天线或掩膜等) 就能产生不同的电磁波照射模式, 发射的电磁波在特定空间不再是均匀平面波, 其幅度非均匀、波前非平面或兼而有之, 探测得到的回波是目标散射系数分布与照射模式的广义卷积, 这即是孔径编码实现主动凝视成像的基本原理. 当仅在接收端编码时所谓“照射模式”只是一个等效概念.

实际上孔径编码成像作为小孔成像的拓展, 在光学成像中已有半个世纪的历史^[2], 但因受限于器件、衍射效应和应用需求在雷达成像中鲜有应用. 近年来发展的时空二维随机辐射场微波关联成像^[3-5]、电磁涡旋成像^[6] 可视为孔径编码成像在微波频段的有益尝试, 一般通过复杂的有源相控阵技术实现. 太赫兹波的频段范围在 0.1 ~ 10 THz 之间, 在太赫兹频段发展孔径编码成像既面临迫切的需求, 也具有独特的优势. 一方面, 视频合成孔径雷达 (Video SAR, ViSAR)、安检雷达等应用已愈加明确地表明须采用太赫兹频段, 例如 ViSAR 系统典型频段为 230 GHz 和 340 GHz^[7], 美国加州喷气推进实验室安检雷达典型频段为 580 GHz^[8], 而上述基于合成孔径和逐点扫描的系统帧率分别为 5 Hz 和 1 Hz, 人们希望获得 10 Hz 以上的帧率 (相控阵技术可以实现但过于复杂且太赫兹频段 T/R 组件远不成熟). 另一方面, 太赫兹波具有更高频率和更短波长, 使太赫兹雷达能够提供更大的绝对带宽, 在相同孔径天线条件下, 太赫兹波波长短、近场效应显著, 更易产生多样性的照射模式和更快的照射模式切换速度, 从而具有更高帧率、更高分辨成像的潜力; 同时容易实现器件小型化. 液晶基板反射式天线、超材料、集成光电导天线、空间光调制等技术的发展也为实现太赫兹孔径编码提供了基础器件支撑.

近年来, 我们在国家 973、863、武器装备探索研究、国家自然科学基金等项目支持下围绕太赫兹雷达成像^[9-11]、太赫兹目标散射特性^[12-13] 和微波关联

成像^[14-15] 开展了探索性研究, 为孔径编码成像提供了技术储备. 本文对孔径编码成像进行了分析和思考, 介绍了其提出的背景, 下面继续从原理、现状、实现方式、关键问题和应用前景等方面进行进一步的阐述, 为推动国内太赫兹孔径编码成像研究提供一定的借鉴.

1 孔径编码成像原理

当我们梳理雷达成像的发展历程时不难发现, 它在收发方式上遵循着“一发一收→一发多收→多发多收→多发一收”的轨迹. 孔径编码成像本质上属于多发一收、单像素接收的范畴. 表面上看, 多发一收与一发多收完全等价, 并且从波数域看意味着相同的相位中心空间分布. 但是, 多发一收能够提供更加丰富的波形从而在目标区域合成复杂的电磁波照射模式, 为目标信息提取提供了更大的可能, 这也成为超分辨成像的物理基础.

1.1 分辨原理

距离维的分辨仍然通过发射宽带调频信号获得, 下面主要论述方位-俯仰维分辨.

由平面波分解定理可知, 某一种照射模式可以视为若干不同幅度、频率、初相和入射角的均匀平面波的叠加. 照射模式越多样则自由度越高, 回波中携带的目标信息越丰富, 利用回波进行目标高分辨成像的潜力也就越大, 有望利用有限的孔径、在极短的时间内获得超出传统实孔径瑞利分辨极限的分辨率.

基于孔径编码的成像方法通过孔径编码以实现电磁波方向图和波前空间调制的目的. 借鉴微波关联成像的思想, 该成像方式在探测区域内形成时空二维随机分布的辐射场. 由于探测得到的回波是目标散射系数分布与辐射场的广义卷积, 探测区域内形成的辐射场时空非相关性越强, 孔径编码成像实现波束内超分辨的可能性越大^[3]. 基于孔径编码的成像方法不需要利用多普勒频率进行方位向分辨, 从而将大大降低成像对相对运动的依赖, 获得前视、凝视成像能力^[16-18]. 参考微波关联成像的特点, 其分辨率由波长、电控反射面和机械反射镜孔径大小、带宽、孔径编码方式综合决定, 分辨率可比同口径实孔径雷达提高若干倍^[3, 15, 17].

作为一个例子, 图 1 ~ 图 3 给出了 300 GHz 下反射面天线反射的单频电磁场方向图和波前快照. 反射面边长 2.5 cm, 包含 200 个阵元, 不移相情况下波束主瓣 3 dB 宽度 2°, 在此基础上对每个阵元用

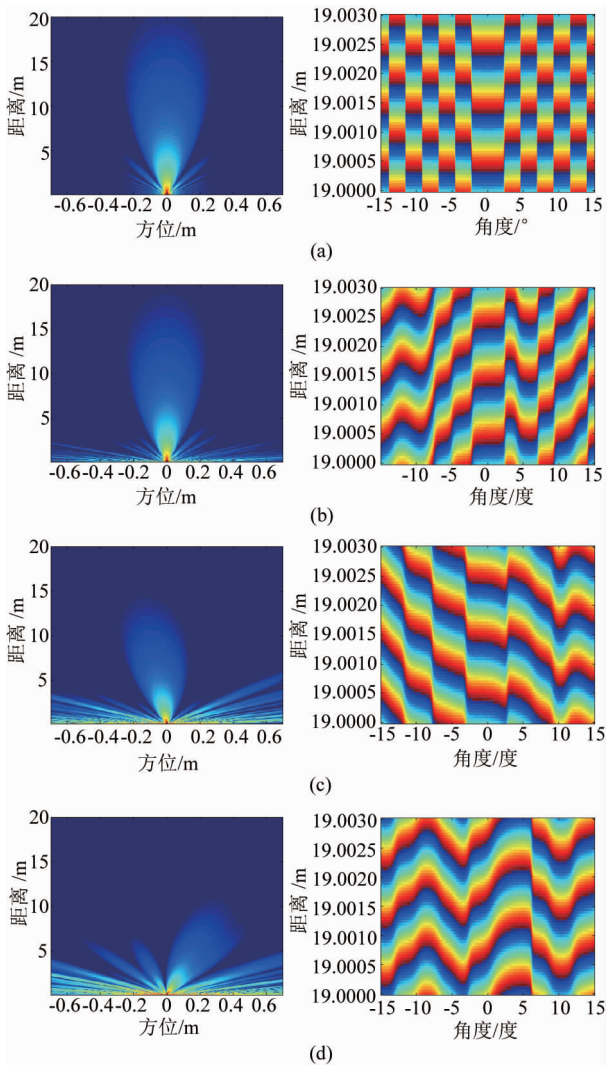


图1 不同随机移相情况下的方向图和相位(波前)空间分布特性,取1次样本 (a) 不随机 (b) $[-\pi/2, \pi/2]$ 间随机移相 (c) $[-\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi]$ 间随机移相 (d) $[-\pi, \pi]$ 间随机移相

Fig. 1 Spatial distribution of antenna pattern and phase for different randomly-shifted phase. (a) Without random phase (b) $[-\pi/2, \pi/2]$ With random phase between (c) $[-\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi]$ With random phase between (d) $[-\pi, \pi]$ With random phase between

不同的均匀分布随机数移相形成一次反射场快照,亦即形成一次孔径编码,然后切换至下一次移相方式.可见 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内随机移相基本不改变主瓣大小和指向,主瓣内相位仍表现为平面波.随着相位随机性的增强,方向图不再是 sinc 函数、相位不再表现为平面波即出现波前调制,且随着孔径编码切换而变化剧烈,对超分辨成像也越有利.从图3也可看出,在完全随机的情况下方向图变化剧烈,仅利用方向图幅度信息也有对目标超分辨成像的可能,此时

无法进行波束形成.实际中需要波束形成时,波束形成与波前调制可以同时进行.

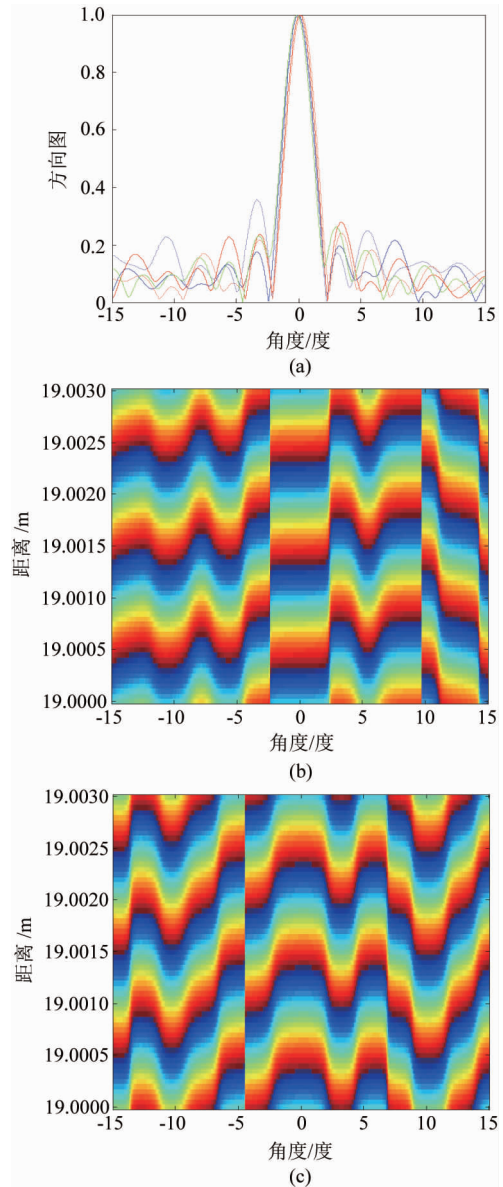


图2 $[-\pi/2, \pi/2]$ 间各阵元多次随机移相后相位空间分布 (a)5次移相方向图 (b)第1次移相后相位分布 (c)第五次移相后相位分布

Fig. 2 Spatial phase distribution after random phase-shifting between $[-\pi/2, \pi/2]$ for all elements. (a) Antenna pattern after the five times of phase shifting (b) Phase distribution after the first phase shifting (c) Phase distribution after the fifth phase shifting

从数学上看,在凝视观测场景中,接收天线位置处接收的散射回波可以写成以下 Fredholm 方程形式:

$$E_s(t) = \int_s \sigma(\mathbf{r}_0) E_i(\mathbf{r}_o, t) dS \quad (1)$$

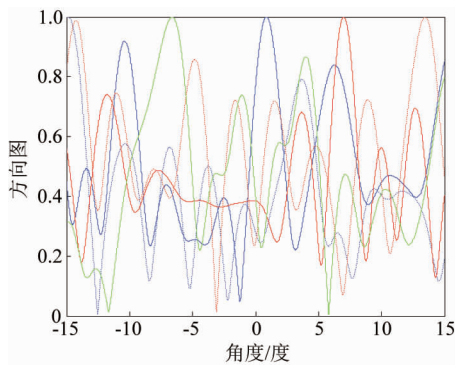


图3 $[-\pi/2, \pi/2]$ 各阵元5次随机移相后方向图,移相范围 $[-\pi, \pi]$

Fig. 3 Antenna pattern for five times of phase shifting between $[-\pi, \pi]$

显然,散射回波信号 $E_s(t)$ 是不同位置处的目标散射信息 $\sigma(\mathbf{r}_0)$ 与辐射场 $E_i(\mathbf{r}_0, t)$ 乘积的积分(广义卷积). 由于单个波束内的辐射场是近似均匀分布,从反演图像、解方程的角度分析,一个波束只能对应一个方程,无法实现波束内的超分辨;要分辨波束内的多个目标散射点,就要解对应多个线性独立、正交的方程. 因此,在同一波束覆盖区域内,要求波束内辐射场分布具备时间上和空间上统计、独立的特性,这样,波束内的不同目标就被差异性分布的辐射场所标度,以确保散射场回波蕴含了可辨识的目标空间分布信息,为目标信息的解耦和分辨提供了可能.

可以看出式(1)所示为一线性过程,对于线性成像系统,又可表示为如下矩阵方程的形式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (2)$$

其中 \mathbf{x} 代表待恢复图像(目标散射系数), \mathbf{y} 代表目标回波数据, \mathbf{H} 代表成像系统的传递函数,由成像模型决定. 成像正问题建模实际就是对 \mathbf{H} 的建模过程,成像过程就是通过正则化、压缩感知等工具解方程求 \mathbf{x} . 可见, (2) 式中 \mathbf{H} 与传统成像模型的主要差别就在于孔径编码导致的对目标的不同照射模式. 同时可见, 尽管未利用倏逝波和电磁波极近场传播效应仍可实现超分辨, 这种超分辨是物理上丰富的照射模式与数学上先进的信息提取手段(压缩感知、稀疏贝叶斯学习等)两者综合作用的结果.

1.2 太赫兹孔径编码成像特点

尽管在多个频段都可采用孔径编码成像,但太赫兹孔径编码成像具有以下突出的优势:

(1) 收发链路相对简单

射频链路采用一发一收,因此系统结构简单且

容易小型化,便于弹载平台等应用背景. 由于天线辐射的电磁波还将通过反射式天线编码后反射,系统整体上仍可视为多发一收系统.

(2) 照射模式丰富多样

太赫兹频段波长短、带宽大,更易产生复杂多样的照射模式,甚至只需移相(不需调频)即可实现. 此外,太赫兹频段近场(球面波)效应显著,基于此可获得更加丰富的照射模式.

(3) 成像分辨高、帧率高且符合视觉

一方面具有高分辨高帧率前视和凝视3D成像能力,分辨率可超过同等尺寸实孔径成像,典型分辨率达到厘米级,帧率达到10 Hz,并且能够成出目标横剖面图像(传统雷达只能成出距离-多普勒平面图像);另一方面在太赫兹频段目标表现出粗糙特性,图像具有类光学特点,成像效果更加符合视觉.

(4) 穿透性强

太赫兹波能够穿透薄衣、烟尘等非极性材料以及振荡频率低于太赫兹频率的等离子体,从而对隐蔽物和目标本体成像.

尽管存在上述诸多优势,但太赫兹孔径编码成像也具有以下缺点亟待克服:

(1) 照射模式复杂,且产生复杂照射模式的反射式天线等技术尚不成熟,反射式天线一般只能移相无法调频;

(2) 宽带线性调频信号存在严重的非线性效应,采用其他类型的大带宽信号又难以去斜接收,对中频带宽和采样速率要求高;

(3) 成像处理属参数化解方程方法,对系统和目标特性建模误差极为敏感,难以直接利用后向投影和其他基于快速傅里叶变换(FFT)的稳健成像算法;

(4) 大气衰减严重;

(5) 成像距离缩短.

孔径编码成像方式通过空间幅相编码实现对太赫兹波方向图和波前的空间调制,从而导致辐射能量分散,缩短成像距离. 因此,该成像方法主要适用于快速安检、无损检测以及近炸引信等近距成像领域. 而针对战场侦察与警戒以及末制导等成像应用领域,则可采用抛物面反射镜等太赫兹准直与聚焦元件对太赫兹波空间衍射弥散进行一定的控制,以实现中等距离成像,满足特定军事应用需求. 同时,还可以采用电子学或真空电子学方式提高太赫兹源的发射功率进一步增加系统作用距离.

2 孔径编码成像研究现状

下面继续介绍孔径编码成像的研究现状,其中可见太赫兹孔径编码成像与光学孔径编码和微波关联成像的区别,然后介绍太赫兹孔径编码天线的研究现状。

2.1 孔径编码成像研究现状

2.1.1 光学频段

孔径编码成像是经典小孔成像的拓展,最早在光学成像(尤其 X 射线成像)中获得了重要应用。它是一种两步成像过程^[19],第一步是用多个小孔(针孔阵列)以不同空间排布方式尽可能多地收集目标源的信息,得到目标的重叠像,即得到目标函数与编码孔径点扩展函数的卷积;第二步是对重叠像进行重构,即解卷积。编码孔径成像具有较大的视场,且一个点目标经编码孔径后对整个接收平面均有作用。因此,编码孔径成像技术对噪声干扰不十分敏感,应用该技术可得到较高的成像信噪比和集光效率。编码类型主要有随机阵列、均匀冗余阵列、环形阵列等。

2.1.2 微波频段

将孔径编码的思想应用于微波毫米波成像,在相同的天线尺寸下,能获得更高的成像分辨率。与光学方式不同的是,孔径编码是在发射端通过对场幅度(方向图)或相位(波前)空间分布的控制完成的。主要包括以下两种形式。

(1) 基于超材料的微波成像(利用方向图)

基于超材料的微波成像利用不同频率微波通过超材料阵列产生不同辐射模式(图 4(a)),在空间形成幅度上随机的照射模式(图 4(b)),从而实现孔径内的超分辨率成像,整个系统只需要一个 K 波段微波探测器,2013 年由美国 Duke 大学 J. Hunt 等人提出^[20],其思想同上。该方案主要是通过频率资源换得空间(孔径)资源,但从实测数据处理经验上看实际中变化的天线方向图的标定极其困难,实验室结果距离实际应用还很遥远。

(2) 微波关联成像(利用波前)

微波关联成像中,通过多发一收、发射端天线调制(调相、调频等),雷达波束内不同目标处形成具有差异性分布的辐射场激励(一般是时空二维随机辐射场或涡旋场),目标散射回波中将蕴含更多的目标信息,采用二阶(高阶)关联方法实现对目标的成像,能够提升雷达对目标的成像分辨能力。在中科院上海光机所成功研制的激光三维强度关联成像原

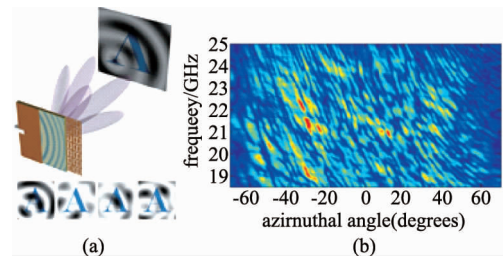


图 4 基于超材料的微波成像系统^[20]。(a) 成像模型(b) 辐射场分布

Fig. 4 A microwave imaging system based on meta-materials^[20]. (a) Imaging model, (b) distribution of the radiation field

理样机基础上,中国电子科技集团 51 所、中国科技大学和国防科技大学分别研制成功微波关联成像原理样机,开展了百米量级距离成像试验^[3-5,17-18],无论在思想还是实验上都是由我国学者率先做出的开创性工作。

尤其需要指出,根据天线互易定理,关联成像也可采用一发多收、接收端天线调制或编码的方式来实现,此时空间中实际传播的电磁波并不存在复杂的辐射场、波前或照射模式(但可以认为“接收方向图”或信号处理意义上的“等效辐射场”复杂),却依然可以实现超越(接收)孔径的分辨。从这个意义上说,我们认为“孔径编码”一词比“关联成像”、“波前调制”、“复杂照射模式”等更能反映出超分辨成像的本质。

2.1.3 太赫兹频段

将孔径编码的思想应用于太赫兹成像,2007 年美国莱斯大学实现了一种基于单像素探测的太赫兹成像系统^[21],该系统由单一太赫兹辐射源对目标进行透射式成像,太赫兹波透过目标后经过一系列的随机掩膜板由一个太赫兹接收器接收回波,系统装置如图 5 所示;后续利用压缩感知理论对目标图像进行重建,相比于机械扫描式的成像系统,成像速率得到提高。孔径编码由随机掩膜实现。

2009 年 12 月,利物浦大学报道了基于压缩感知的太赫兹脉冲分光成像系统^[22],该系统采用时域光谱技术原理探测回波,太赫兹波透过目标前经过优化的随机掩膜板,系统装置如图 6 所示。相较于普通的随机掩膜板,本系统优化设计的掩膜板可进一步降低采样次数,提高成像效率。

受数字调控掩膜板器件调制深度和调制速率的限制,2016 年 4 月,天津大学提出采用可平移的掩膜板实现孔径编码(图 7)^[23]。基本成像原理同美国

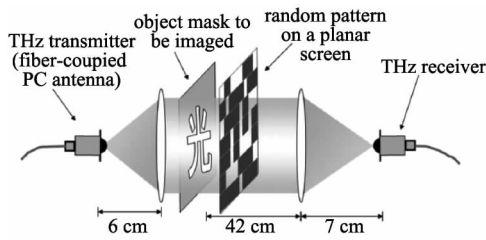


图 5 单像素太赫兹成像系统^[21]
Fig. 5 Terahertz single-pixel imaging system^[21]

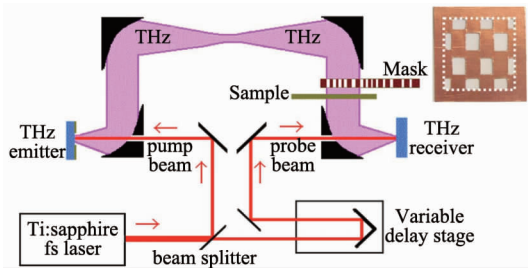


图 6 基于压缩感知的太赫兹脉冲成像实验设计^[22]
Fig. 6 Experimental arrangement for terahertz pulsed imaging using compressive sampling^[22]

莱斯大学方法类似,编码板加在目标之后。但该方法既获得了深度的成像目标空间调制又得到了较高的编码板替换速率,更便于应用到实际成像过程中。

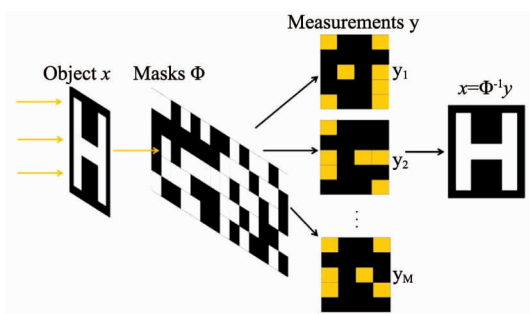


图 7 基于移动掩模板的图像重构过程简图^[23]
Fig. 7 Schematic of imaging process where mask moves for reconstruction^[23]

2014 年 8 月,美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 发布了成像雷达先进扫描技术 (Advanced Scanning Technology for Imaging Radars, ASTIR) 研究项目^[24],旨在寻求一种不依赖于 SAR 和 ISAR 成像中目标或平台运动的先进雷达 3D 成像技术,拥有比相控阵低的系统复杂度和比机械扫描高的成像速率,工作频率范围建议为 70 ~ 700 GHz,视频帧速率大于 10 Hz. DARPA 设想使用电控次反射面和单个收发链

路实现高分辨成像,对次反射面各阵元通过移相进行正交相位编码(即孔径编码)是实现太赫兹光斑内超分辨的关键,如图 8 所示.该方案可以通过增大光斑大小从而提高帧率,对光斑继续超分辨后得到的系统最终分辨率并未下降.值得注意的是该方案在采用线性移相方式时可以退化为逐点扫描或合成孔径成像方式。

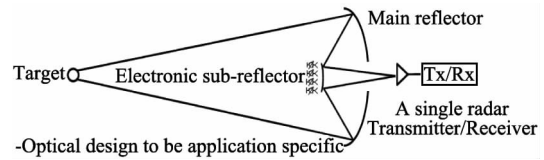


图 8 美国 ASTIR 系统方案^[24]
Fig. 8 Setup of U. S. ASTIR system^[24]

可见,太赫兹孔径编码成像存在上述两类方式,前者趋于光学,在探测接收端编码、非相干接收、透射式工作;后者趋于电子学,在发射端编码、相干接收、反射式工作,且一般采用反射式天线实现编码,目前的反射式天线一般只能移相.需要特别说明的是,鉴于后者更符合雷达工作方式作用距离更远,本文所指的太赫兹孔径编码成像主要指这一方式(反射式移相).从这个意义上讲,ASTIR 项目的发布是太赫兹孔径编码成像发展的里程碑事件.此外,如果太赫兹频段相关器件成熟,2.1.2 节微波毫米波频段的孔径编码成像方式在太赫兹频段同样适用,且基于集成光电导天线调幅的成像方式同样适用,不属本文重点。

2.2 太赫兹孔径编码天线研究现状

依据调相原理和材料的不同,反射式移相天线分类如图 9 所示.太赫兹孔径编码天线可采用图中“可编程调相”下的任一种.本文重点介绍其中具有代表性的液晶天线和可编程超材料天线。

(1) 基于液晶基板的相控阵列天线

液晶由于具有各向异性及介电常数可调的特性,成为太赫兹器件的研究热点.近年来国外研究者纷纷把这种特性应用到反射阵天线中^[25-26].液晶反射阵天线以液晶板作为介质层,通过外加电压改变液晶分子取向从而改变等效介电常数最终改变反射波相位.基于液晶材料的反射相控阵天线是目前技术中加工难度最低、制造成本最低廉的实现方式.西班牙马德里理工大学的学者对 Ka 波段和 F 波段的单谐振反射阵列单元进行仿真设计和分析,并通过实物测试验证了天线性能^[27-28]初步研究了太赫兹

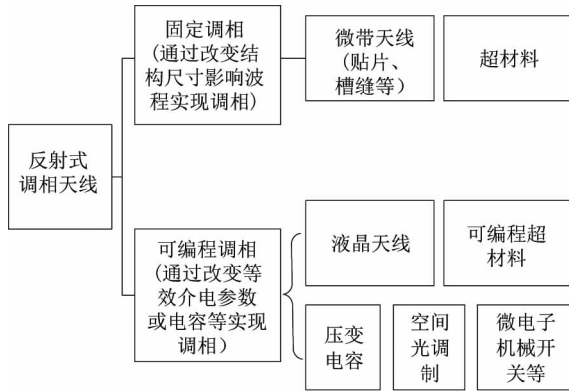


图9 反射式调相天线分类
Fig.9 Category of reflecting phase-shiftable antennas

频段(340 GHz)多谐振反射阵列单元的移相特性^[29]。2015年该团队完成了96~100 GHz液晶可调谐反射天线的制作与测试(图10)^[30]。

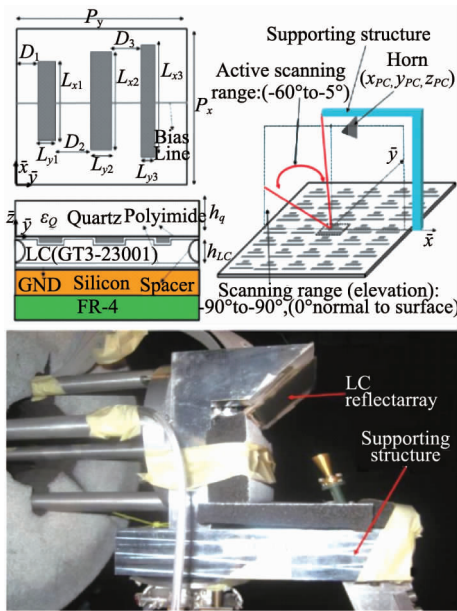


图10 96~100 GHz 液晶反射阵列天线^[30]
Fig.10 96 to 104 GHz liquid crystal-based reflect array antenna^[30]

(2) 基于超材料的相控阵列天线

可编程数字人工表面(可编程超材料)的概念出现在2014年^[31],由崔铁军教授课题组首次提出。对于1比特的人工表面,其构成单元只需要两种,抽象表示为“0”单元和“1”单元,通过控制这种“0”和“1”的分布,可实现不同功能的人工表面,若用数字控制部分来控制这种分布,则可以构成实时可控的人工表面,即现场可编程人工表面(图11)。

两类天线的比较如表1所示。

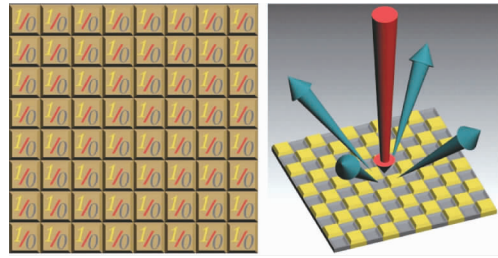


图11 1比特数字超材料表面和编码超材料表面^[31]
Fig.11 The 1-bit digital metasurface and coding metasurface^[31]

表1 基于新型人工电磁表面与基于液晶基板的反射式相控阵列天线技术的对比

	基于液晶基板的相控阵天线技术	基于新型人工电磁表面的相控阵天线技术
优势	直流偏置电压驱动,功耗低; 可电控实现360°连续移相; 单元独立可控,波前可自由赋形; 重量轻,成本低,工艺简单,可利用现有液晶面板技术。	数字调相; 单个阵元相位切换时间约1 μs; 性能由孔径编码分布确定,可实现全数字控制。
不足	响应时间为毫秒量级(理论上可达亚毫秒量级),且存在较大的吸收损耗。	最高工作频率受限于肖特基结构的截止工作频率,大约在0.3~0.6 THz之间;只能在360°内离散移相。
水平	2015年西班牙完成0.96~0.1 THz天线制作 ^[30] 。	2015年东南大学完成X波段天线制作 ^[31] ,太赫兹频段天线制作尚不成熟。

3 太赫兹孔径编码成像实现方式与关键问题

典型但不唯一的太赫兹孔径编码成像雷达系统主要由发射机、接收机、电控次反射面(用于孔径编码的反射式天线)、主反射面、接收天线以及数据处理器组成,如图12所示。

主反射面采用椭球反射镜,发射机负责发射宽带信号,接收机负责采集回波信号,电控次反射面负责对入射的宽带信号进行相位调制与波束形成并将电磁波反射至主反射面。相位调制的方式决定了孔径编码形式,可采用线性移相基础上的随机移相,既可波束形成以控制波束指向同时在波束内部可以形成非平面波前从而获得波束内超分辨能力,这种方式避免了主反射面的机械扫描。主反射面对电磁能量进行汇集形成“光斑”从而对特定区域目标进行探测。控制器与数据处理器负责产生发射波形、处理多通道接收数据以及控制电控次反射面。尽管不需

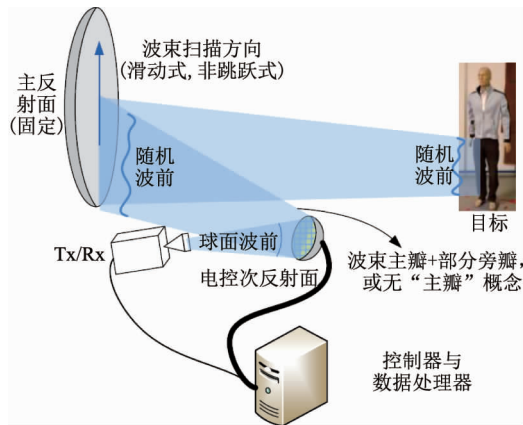


图 12 太赫兹孔径编码成像雷达系统组成示意图
Fig. 12 Setup of a typical terahertz coded aperture imaging radar system

主反射面也可成像,如同传统相控阵成像和采用阵列的微波关联成像一样,但加入主反射面进行聚焦后可以在成像平面获得较高信噪比,提高成像分辨率.上述系统中回波接收时也可不受编码调制,调相的反射式天线也可换成调幅的反射式天线,反射式天线还可换成透射式天线.

需要研究的关键问题主要包括:孔径编码成像原理模型与超分辨机理、孔径编码成像系统设计、孔径编码设计、孔径编码天线设计、合成辐射场推演、测量和标定、孔径编码成像算法与分辨性能评价、复杂照射模式下的目标特性.考虑到实际应用,还需攻克“损耗低、切换时间快、相位控制网络复杂度适中、成本低的电控反射面天线”等器件,需要解决成像平面光斑大小空变、背景杂波影响、系统误差、目标非合作运动非理想散射、网格失配等棘手问题,限于篇幅不再展开论述.

4 太赫兹孔径编码成像应用前景

太赫兹孔径编码成像由于具有高分辨、高帧率、前视凝视等诸多优势,在军事和民用领域有着广阔的应用前景.其应用前景主要包括:(1)直升机平台战场侦察与警戒;(2)单兵或车载平台目标搜索与瞄准;(3)雷达导引头末制导与近炸引信;(4)站开式安检与反恐.上述应用对分辨率的要求约在 0.1 ~ 10 cm 之间,对实时性的要求约在 1 ~ 100 ms 之间,其中近炸引信由于距离极近要求成像时间不得超过 1 ms.尽管微波和毫米波能够通过孔径合成实现前视成像,但在分辨率、实时性、小型化方面难以满足上述要求,在一定程度上体现了太赫兹孔径编

码成像的不可替代性.

孔径编码成像尽管有着诱人的应用前景也不存在原理性问题,但其实际应用依赖于器件发展和前述关键问题的突破,初步预判实验系统在 3 ~ 5 年内成为现实,真正实际应用尚需 10 年左右时间.

5 结语

太赫兹孔径编码成像突破了雷达成像领域经典的层析原理和距离多普勒原理,不依赖雷达-目标相对运动即可实现高帧率和高分辨成像,部分克服了保铮院士概括的“运动是成像的依据、也是问题的根源”^[1]这一矛盾,把电磁波幅度、频率、相位、极化调制拓展到空间幅相调制,加深和拓宽了人们对电磁波的认识、操控和利用,有望成为雷达成像领域继 SAR/ISAR、多发多收 (Multi-Input Multi-Output, MI-MO) 雷达和微波关联成像之后的又一变革,可认为属于“计算成像”范畴.太赫兹孔径编码成像的超分辨能力是物理上丰富的等效照射模式与数学上先进的信息提取手段两者综合作用的结果.此外,太赫兹孔径编码成像雷达中包含大量光路,它充分利用了太赫兹波的近光学特点,是电子学和光学融合发展的产物.发展太赫兹孔径编码成像雷达将为安检、末制导、近炸引信等领域的应用提供一条全新的技术途径.随着反射式天线等器件的飞速发展,太赫兹孔径编码成像雷达预计在 3 ~ 5 年内成为现实.最后需要说明的是,孔径编码成像与合成孔径雷达成像并非完全不相容,两者有望相互补充结合,共同将雷达成像技术发展人类孜孜以求的更高阶段.近年来出现的电磁涡旋与衍射层析融合成像^[32]为这种结合提供了很好的范例.

致谢

感谢东南大学崔铁军教授、万向讲师和合肥工业大学杨军副研究员、尹治平副研究员与作者的讨论、合作研究及提出的建设性建议;感谢国防科技大学程永强副研究员提供的部分研究现状素材.

References

- [1] BAO Zheng, XING Meng-Dao, WANG Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Electronic industry press (保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社), 2005.
- [2] CHENG Li-Hong. Theory and experimental research on x-ray imaging by coded aperture [D]. Dissertation for the Doctoral Degree, Dalian: Dalian University of Technology (程丽红. X 光编码孔径成像理论及实验研究. 大连理工大学学位论文), 2005.

- [3] LI Dong-Ze. Radar coincidence imaging technique research [D]. *Dissertation for the Doctoral Degree, Changsha: National University of Defense Technology* (李东泽. 雷达关联成像技术研究. 国防科技大学学位论文), 2014.
- [4] XU Hao. Research on radar imaging base on space spectrum theory and temporal-spatial stochastic radiation field [D]. *Dissertation for the Doctoral Degree, Hefei: China Science & Technology University* (徐浩. 基于空间谱理论和时空二维随机辐射场的雷达成像研究. 中国科学技术大学学位论文), 2011.
- [5] ZHOU Hai-Fei. Research on a new method of microwave staring imaging based on spatial-temporal random radiation field and characteristics of random radiation source [D]. *Dissertation for the Master's Degree, Hefei: China Science & Technology University* (周海飞. 基于时空随机辐射场的微波凝视成像新方法及其辐射源特性研究. 中国科学技术大学学位论文), 2011.
- [6] GUO Gui-Rong, HU Wei-Dong, DU Xiao-Yong. Electromagnetic vortex based radar target imaging [J]. *Journal of National University of Defense Technology* (郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像. *国防科技大学学报*), 2013, **35**(6): 71–76.
- [7] WALLACE H B. Video synthetic aperture radar (ViSAR) [R]. DARPA, 2012.
- [8] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008, **18**(1): 64–66.
- [9] Wang R, Wnag H Q, Deng B, et al. High-resolution terahertz radar imaging based on electromagnetic calculation data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2014, **33**(6): 577–583.
- [10] Wang R, Deng B, Qin Y, et al. Bistatic terahertz radar azimuth-elevation imaging based on compressed sensing [J]. *IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology*. 2014, **4**(6): 702–713.
- [11] Wang H Q, Wang R J, Deng B, et al. Compressed sensing of terahertz radar azimuth-elevation imaging [J]. *Journal of Electronic Imaging*. 2015, **24**(1): 13035.
- [12] Wang R, Deng B, Qin Y L, et al. Study of scattering characteristics for metallic spheres at terahertz frequencies [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2014, **28**(14): 1786–1797.
- [13] Wang R, Deng B, Wang H, et al. Electromagnetic scattering characteristic of aluminous targets in the terahertz and far infrared region [J]. *ACTA PHYSICA SINICA*. 2014, **63**(13): 13410201–13410210.
- [14] Li D Z, Li X, Qin Y L, et al. Radar coincidence imaging: an instantaneous imaging technique with stochastic signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014, **52**(4): 2261–2277.
- [15] Liu K, Cheng Y Q, Yang Z C, et al. Orbital angular momentum based electromagnetic vortex imaging [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015, **14**: 711–714.
- [16] YANG Kai-Xin. Research on Airborne Forward-looking high resolution imaging radar system [D]. *Dissertation for the Doctoral Degree, Xi'an: Xi'an Electronics Science and Technology University* (杨凯新. 机载雷达前视高分辨成像方法研究. 西安电子科技大学学位论文), 2012.
- [17] HE Xue-Zi. The Information Processing Methods and Simulations in Microwave Staring Correlated Imaging [D]. *Dissertation for the Doctoral Degree, Hefei: China Science & Technology University* (何学智. 微波凝视关联成像的信息处理方法与仿真. 中国科学技术大学学位论文), 2013.
- [18] WANG Dong-Jin, MA Yuan-Peng, LU Guang-Hua, et al. A Microwave Staring Correlated Imaging Method (王东进, 马远鹏, 陆广华, 等. 微波凝视成像关联方法), 102141617A [P]. 2011–08–03.
- [19] HONG Jun-Jie, RONG Jun-Yan, WANG Ren-Song, et al. Data correction for coded aperture in the near-field imaging [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology* (洪俊杰, 戎军艳, 王人松, 等. 近场编码孔径成像的数据校正. *核电子学与探测技术*), 2007, **27**(4): 764–767.
- [20] Hunt J, Driscoll T, Mrozack A, et al. Metamaterial apertures for computational imaging [J]. *Nature*. 2013, **339**: 310–314.
- [21] Chan W L, Moravec M L, Baraniuk R G, et al. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval [J]. *Optics Letters*. 2008, **33**(9): 974–976.
- [22] Shen Y C, Gan L, Stringer M, et al. Terahertz pulsed spectroscopic imaging using optimized binary masks [J]. *Applied Physics Letters*. 2009, **95**: 231112.
- [23] Pan D, Wang Y Y, Xu D G, et al. Single pixel imaging with tunable terahertz parametric oscillator [J]. *Applied Optics*. 2016, **55**(13): 3670–3675.
- [24] [s. n.]. Advanced scanning technology for imaging radars (ASTIR) [R]. DARPA, 2014.
- [25] Hung W T, Tung J J, Chen S Y. A focusing reflectarray and its application in microwave virus sanitizer [J]. *Radio Science*. 2014, **49**(10): 890–898.
- [26] Bildik S, Dieter S, Fritzsche C, et al. Reconfigurable folded reflectarray antenna based upon liquid crystal technology [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015, **63**(1): 122–132.
- [27] Perez-Palomino G, Baine P, Dickie R, et al. Design and experimental validation of liquid crystal-based reconfigurable reflectarray elements with improved bandwidth in f-band [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013, **61**(4): 1704–1713.
- [28] Florencio R, Encinar J, Boix R R, et al. Dual-polarisation reflectarray made of cells with two orthogonal sets of parallel dipoles for bandwidth and cross-polarisation improvement [J]. *IET on Microwaves, Antennas & Propagation*. 2014, **8**(15): 1389–1397.
- [29] Perez-Palomino G, Encinar J A, Dickie R, et al. Preliminary design of a liquid crystal-based reflectarray antenna for beam-scanning in THz [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2013: 2277–2278.
- [30] Perez-Palomino G, Barba M, Encinar J A, et al. Design and demonstration of an electronically scanned reflectarray antenna at 100GHz using multiresonant cells based on liquid crystals [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015, **63**(8): 3722–3727.
- [31] Cui T, Qi M, Wang X, et al. coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & applications*. 2014, **3**(e218).
- [32] Li L, Li F. Beating the rayleigh limit: orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography [J]. *Physical Review E*. 2013, **033205** (88): 332051–3320516.