

文章编号: 2095-4980(2013)04-0507-05

太赫兹成像雷达技术发展与应用探讨

徐刚锋, 张 岩

(第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘要: 太赫兹波是频段介于红外光和毫米波之间的电磁辐射, 处于电子学向光学的过渡区域, 兼顾了微波穿透特性和红外线成像分辨率高的特点, 在雷达、宽带通信、安全探测和遥感侦察等军事领域具有巨大的潜在应用前景。本文介绍了太赫兹成像雷达的技术特点, 结合导弹制导的应用要求和技术发展现状, 重点分析了太赫兹成像雷达技术应用于制导的可行性, 并对相关问题进行了初步探讨。

关键词: 太赫兹; 成像雷达; 制导

中图分类号: TN958.2

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0507

Development of Terahertz imaging radar technology and its guidance application

XU Gang-feng, ZHANG Yan

(The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: As the electromagnetic radiation between infrared and millimeter waves, Terahertz wave is in the transition area from electronics to optical, which bears the characteristics of both the penetrability of microwave and high resolution of infrared imaging. Therefore, it is suitable to enormous potential applications in military fields including radar, broadband communication, security detection and remote reconnaissance. The characteristics of THz imaging radar technology are introduced in this paper. Combined with the application requirements of the missile guidance and the technical development status, the feasibility of THz imaging radar technology used in guidance is analyzed. The related problems are discussed as well.

Key words: Terahertz(THz); imaging radar; guidance

为实现导弹武器的精确打击, 各军事强国已在对空、对海及对地等不同导弹平台上应用了不同成像体制的制导技术, 典型的有红外/可见光成像、雷达(微波或毫米波)成像等。从目前已应用的成像制导技术特点来看, 如红外/可见光成像制导是通过目标被动高分辨力成像, 实现导弹高精度寻的制导, 但红外/可见光波段受大气、烟幕及沙尘等衰减严重, 作用距离较近, 环境适应性一般, 且高速条件下还易受气动光学效应影响; 微波或毫米波雷达成像体制由于工作波长更长, 对天候适应性更强, 但受天线波束宽度约束, 无法实现前视高分辨二维成像, 需要借助平台进行方位向多普勒调频, 以实现合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)二维成像, 使用模式及制导精确度受限。为此, 迫切需要发展能融合光学和雷达技术优势的新制导体制, 以提高导弹的制导精确度和使用适应性。

太赫兹波也称为亚毫米波或远红外线, 指频率从 0.1 THz~10 THz(1 THz=10¹² Hz, 波长范围为 30 μm~3 mm), 介于毫米波与红外光之间的电磁波。太赫兹波兼有微波毫米波与红外可见光 2 个波段特性, 相比红外及可见光, 太赫兹波波束宽度适中, 易于实现对目标的跟踪瞄准, 穿透性能好, 能以较小的损耗穿透沙尘烟雾及非金属材料; 相比微波毫米波, 太赫兹波波长短, 波束窄, 方向性好, 作用在目标上的功率密度和成像分辨率高^[1]。这些特点为太赫兹在军事上的应用, 尤其是目标信息获取和信息对抗提供了巨大的发展空间。

近年来, 随着太赫兹源、检测及相关器件等关键技术的逐步突破, 太赫兹波一系列独特的优越特性被发现, 世界多国已开始将太赫兹波应用于雷达、遥感、国土安全与反恐、高保密的数据通信与传输、大气与环境监测、实时生物信息提

取以及医学诊断等多个不同领域开展太赫兹技术应用研究^[2]。本文将重点研究太赫兹成像的技术特点,针对目前的技术发展现状,分析太赫兹成像雷达技术在制导领域应用的优势及技术差距,并结合需求提出发展建议。

1 太赫兹成像雷达技术特点

1.1 太赫兹成像机理

太赫兹电磁波成像的基本原理是将已知波形的太赫兹电磁波作为成像射线,利用透过成像目标或从目标反射的太赫兹波强度和相位信息,并经过适当的数字处理和频谱分析,得到目标的太赫兹电磁波图像^[3]。根据太赫兹波产生和探测机理的形式,太赫兹成像可以分为脉冲成像和连续波成像 2 类^[4]。

1) 太赫兹脉冲成像

太赫兹脉冲成像的每一个成像点对应一个时域波形,可以从时域信号或它的傅里叶变换谱中选择任意一个数据点的振幅或位相进行成像,从而重构目标的空间密度分布、折射率和厚度分布。第一个太赫兹成像,是 1995 年由 Hu Bin bin^[5]等人研究得到,该成像系统是基于时域光谱技术,最初的应用是利用振幅的变化研究塑料封装的集成电路的内部引线等结构和树叶中含水量的分布图像。

脉冲成像方法尽管能够获得成像物体上每一点的光谱数据,并可对物体进行光谱成像,但数据获取时间通常较长。尽管可利用 CCD 器件作为探测器,同时实现对整个物体的时域波形进行扫描,提高采集速度,但是相对于扫描成像来说信噪比要低得多,成像质量大大降低,应用受限。

2) 太赫兹连续成像

连续波成像系统与脉冲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 成像系统省去了泵浦—探测成像装置,所需元件数量很少,大大降低了光学复杂性。同时系统也无需时间延迟扫描,成像速度得到了大幅度提升。只是当 THz 产生源的频率一定,且只有一个探测器时,连续 THz 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 成像系统具有小型、简单、快速和相对低廉的特点。连续波成像系统有透射式和反射式 2 种不同的成像模式^[6]。

综合来看,目前太赫兹成像技术多应用于医疗检测、环境监测、安全检查等领域,应用时主要受以下几方面因素的影响^[4]:

1) 水吸收的影响:水对太赫兹辐射吸收能力很强,大大降低了成像的灵敏度。

2) 温度的影响:大多数太赫兹探测器对温度极为敏感,外部温度的变化会使探测器发生很大的失真。

3) 探测器的影响:对于太赫兹激光仍缺少有效的探测手段,功率计有很好的线性,但是响应时间过长,普通针对太赫兹波段的探测器在灵敏度和线性方面都有待提高。

4) 信噪比的影响:目前所产生的太赫兹激光都在毫瓦量级,加上探测器的灵敏度不高,使得探测到的信噪比较低,要获得更好的成像效果,必须提高光源的能量。

5) 分辨力的影响:成像得到的空间分辨力在太赫兹成像中主要取决于光束的束腰半径,由于目前太赫兹激光产生的束腰半径都比较大,直接影响了成像质量。

6) 功率稳定性影响:对于气体泵浦太赫兹激光器,输出光功率和体积方面性能较好,但是泵浦 CO₂ 激光器输出波长的不稳定会造成太赫兹激光的功率不稳定,对成像有很大影响。

1.2 太赫兹成像雷达技术特点

太赫兹雷达工作波段为太赫兹,实现传统雷达对目标的测距、测角、测速及成像等功能。目前,国内外相关研究机构已开展了大量的太赫兹雷达研究工作。如美国 JPL 实验室研制的高分辨力雷达探测系统^[7],工作频率 0.6 THz,可实现 5 s 内对 25 m 远、50 cm×50 cm 视场的视场成像;德国 FGAN 研究所研制的 THz ISAR 成像雷达 COBRA-220^[8],应用于近距离隐藏武器的探测、军营和舰艇的防护,工作频率 0.22 THz,探测距离达到 500 m,成像分辨力达到 1.8 cm。

由于太赫兹的波长远小于微波及毫米波,适于大信号带宽和窄天线波束的实现,利于实现目标的高分辨力成像,且物体运动引起的多普勒效应更为显著,更易于检测目标的运动特征。这些特点使得太赫兹雷达探测系统具有小目标探测、高分辨力的目标成像识别能力。相对于微波雷达,太赫兹雷达探测系统具有以下技术优势^[9]:

1) 大带宽:太赫兹频段的波长远小于现有微波、毫米波,太赫兹频段更适合于实现极大信号带宽,可获得目标的高分辨成像,更有利于获取目标的丰富信息。

2) 高角分辨力:太赫兹频段波长更短,易实现窄天线波束,对于固定的天线孔径,在 X 波段工作的雷达比

在太赫兹低端频段上工作的雷达发射天线的波束宽度大 20 倍以上。

3) 强抗干扰能力: 现有的干扰手段主要集中在微波及红外段, 对太赫兹频段难以进行有效的干扰。同时, 太赫兹频段提供的极窄天线波束, 可减少干扰注入雷达主瓣波束的可能性, 降低雷达对干扰的灵敏度。此外, 极高的天线增益也抑制了旁瓣干扰。

4) 反隐身能力: 太赫兹频段对微波吸收材料具有良好的透过率, 有利于对隐身目标的探测, 而且宽带太赫兹雷达波对扁平形薄边缘不会像普通雷达那样形成共振吸收而减弱反射强度, 能产生很小的共振面而使反射波增强。此外, 太赫兹波可以在等离子体中传播, 能有效对抗等离子体隐身。

2 太赫兹成像雷达制导应用可行性分析

根据上述太赫兹成像雷达的技术特点, 其在制导及目标识别领域具有潜在的应用前景。利用太赫兹波方向性强、能量集中的特点, 可实现高分辨力成像雷达和跟踪雷达; 利用太赫兹波穿透物质成像技术, 可以探测隐藏在覆盖物或烟尘中的军事装备; 利用太赫兹波穿透沙尘烟雾的能力, 可研制辅助导航系统; 利用太赫兹波频谱宽的特点, 以太赫兹波作为辐射源的超宽带雷达能够获取隐身飞行器的图像等。下面以导弹制导为应用背景, 分析太赫兹成像雷达的技术可行性。

2.1 太赫兹成像雷达制导应用要求

太赫兹成像雷达应用于导弹制导的关键是要适应导弹平台及使用要求, 包括平台装填空间及载荷、飞行环境的适应性, 多种类目标的适应性、天候天时环境及干扰环境的适应性等。

1) 适应复杂自然环境的要求

由于对全天候、全天时使用的要求, 精确制导面临的自然环境多样和复杂, 包括不同的天候环境、不同的天时、不同的季节及地域场景发生的变化等。

2) 适应多种类目标探测及识别的要求

a) 由于不同目标及背景区域在材质、几何结构形状、电磁散射与辐射特性、光电反射与辐射特性、地理环境等方面具有较大的差异, 要求太赫兹成像雷达对目标具有适应性, 能够准确可靠地获取目标或其背景区域的相关特征信息。

b) 在复杂背景环境下, 目标信号易淹没在背景杂波中, 给目标的检测和识别带来困难, 造成目标的漏检和虚检, 要求太赫兹成像雷达制导技术能够有效抑制背景干扰, 提高目标检测和识别的鲁棒性, 实现自主的探测、识别和跟踪。

3) 适应导弹平台应用的要求

a) 适应平台装填空间和有效载荷: 适应装填空间是指太赫兹成像雷达的体积大小能满足平台的使用空间要求; 适应有效载荷是指雷达的重量能满足平台对重量的要求。

b) 适应平台的飞行环境: 适应平台的飞行环境是指太赫兹成像雷达能适应平台飞行过程中的速度、过载、冲击及温度等环境要求。

c) 适应平台交班精确度和机动控制能力: 交接班精确度、机动控制能力与采用的制导体制应当相互匹配, 重点是太赫兹成像雷达的视场范围、作用距离、成像速度等指标能满足制导使用要求。

4) 适应复杂电磁干扰环境的要求

由于打击对象多为敌重点防护目标, 敌方往往可能设置人为的干扰对抗措施, 使制导精确度下降或工作失效, 要求精确制导技术对干扰环境具有一定的适应性。

2.2 太赫兹成像雷达制导应用可行性

根据导弹制导的使用要求, 针对目前太赫兹成像雷达工作机理和技术发展现状, 探讨其应用方向及可行性。

1) 大气传输特性

受气体分子谐振吸收等因素影响(氧气和水汽分子的谐振频率位于 0.01 THz~1 THz 范围), 太赫兹波在大气中传输有较大衰减。取太赫兹的入射波频率为 0.01 THz~1 THz, 海平面的温度 T 为 288 K, 水汽密度为 $7.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 大气压强 P 为 101.3 kPa, 计算得到的氧气和水汽吸收衰减率随频率变化的典型曲线如图 1 所示^[10]。

从图 1 中可知, 太赫兹波在大气中的吸收衰减率呈现出 1 条若干个尖峰形状的曲线, 这种尖峰为大气吸收峰, 是由气体分子吸收谱线形成的。大气中的水汽对太赫兹波有很强的衰减, 1 THz 以上的太赫兹波大气衰减达到

100 dB/km 以上, 在太赫兹低频段, 衰减相对较小(6 dB/km~10 dB/km)。

受大气传输衰减的影响, 且基于目前辐射源功率的技术状态, 在地面或低空环境中, 太赫兹成像雷达的作用距离只能是几十米到几百米左右, 仅具备近距离制导及侦察的能力。若要达到公里以上的制导要求, 一方面要根据大气传输窗口选取合适的太赫兹工作频段; 另一方面要解决更高能量的太赫兹源关键技术。另外, 考虑到在对流层之外, 水蒸气含量几乎为零, 大气衰减影响大幅降低, 因而太赫兹成像雷达非常适用于临近空间或大气层外空间的目标探测。

2) 目标太赫兹特性

目标特性是导弹对目标精确制导的基础, 通过目标特性的研究可有助于从目标中获取最多的有用信息, 同时对干扰进行最大抑制, 用于目标的检测和识别。

综合目前研究情况来看, 太赫兹成像雷达还多应用于地面环境检测、安全检查及医疗诊断等领域, 重点研究了如气体、毒品及生物活体等太赫兹特性, 但对于军事目标太赫兹特性的研究基本未见报道或尚未开展深入研究。此外, 基于太赫兹成像雷达获取的图像进行感兴趣目标的自主、快速检测和识别也还处于起步状态。

3) 太赫兹辐射源及探测器

根据太赫兹辐射产生的机理, 可以将辐射源分为光学方法和电子学方法 2 大类: 光学方法产生 THz 辐射主要有基于远红外光泵浦产生 THz 辐射、利用超短激光脉冲产生 THz 辐射、利用非线性频率变换过程产生 THz 辐射等; 电子学产生 THz 辐射主要有 THz 量子级联激光器、利用自由电子的 THz 辐射源、基于高能加速器的 THz 辐射源及电子学振荡器频率倍频等。THz 探测器主要分为 4 大类: 辐射量热计和热释电探测器, 电子探测器, 光电导偶极天线及其阵列, 以及用飞秒激光取样的电光晶体等^[11]。

太赫兹辐射源和探测器是太赫兹成像雷达的关键器件, 其性能、结构尺寸及重量是制约导弹制导应用的瓶颈。从目前器件的技术状态来看, 主要存在 THz 辐射源体积大、功率小、成本高以及探测器成像时间较长等问题。

太赫兹成像雷达能否适应平台的热力学环境及视场范围要求还需要结合实际平台的使用环境系统分析。

3 结论

太赫兹技术作为一门新兴的科学被誉为 21 世纪影响人类未来的十大技术之一, 已得到国内外的广泛关注。经过 20 多年的研究, 太赫兹技术已取得较大进展, 并在多个领域显现出巨大的应用前景。但必须认识到, 太赫兹技术从实验室转向更广泛的实际应用, 特别是太赫兹成像雷达技术, 还需重点突破大功率、小型化太赫兹器件, 目标太赫兹特性及高速实时信息处理等关键技术, 以尽快推动太赫兹技术的发展和实际应用。

参考文献:

- [1] 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. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4): 373-377.)
- [2] 李晋. 太赫兹雷达系统总体与信号处理方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (LI Jin. Research on Terahertz Radar System and its Signal Processing[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)
- [3] 张蕾,徐新龙,李福利. 太赫兹(THz)成像的进展概况[J]. 量子电子学报, 2005,22(2):129-134. (ZHANG Lei,XU Xinlong, LI Fuli. Review of the progress of T-ray imaging[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005,22(2):129-134.)
- [4] 袁宏阳. 连续太赫兹波成像系统的应用研究[D]. 北京:首都师范大学, 2009. (YUAN Hongyang. The application research on continuous THz imaging system[D]. Beijing:Capital Normal University, 2009.)
- [5] Hu B B,Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Opt. Lett., 1995(20):1716.
- [6] 张艳东. 连续太赫兹波成像技术的检测应用研究[D]. 北京:首都师范大学, 2008. (ZHANG Yandong. The Application Research on the detection by continuous THz imaging technology[D]. Beijing:Capital Normal University, 2008.)
- [7] Dengler R J,Cooper K B,Chattopadhyay G,et al. 600 GHz Imaging Radar with 2 cm Range Resolution[C]// IEEE MTT-S Int. Digest,Honolulu:[s.n.], 2007:1371-1374.

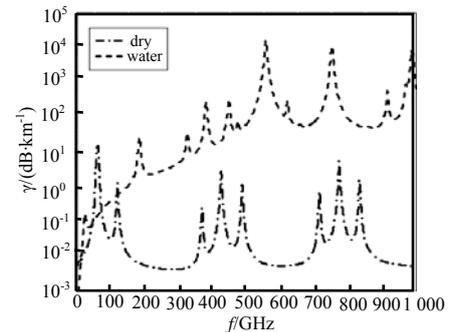


Fig.1 Absorb attenuation of THz wave by frequency

图 1 吸收衰减率随频率的变化

- [8] Weg C A, Spiegel W V, Henneberger R, et al. Fast Active THz Cameras with Ranging Capabilities[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2009,30(8):1281-1296.
- [9] 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用[J]. 微波学报, 2011,27(1):1-5. (ZHENG Xin, LIU Chao. Recent Development of THz Technology and Its Application in Radar and Communication System[J]. Journal of Micro Waves, 2011,27(1):1-5.)
- [10] 黄时光. 太赫兹波传输特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (HUANG Shiguang. Study on the Transmission Characteristic of Terahertz Wave[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.)
- [11] 王磊,李飙. 太赫兹波及其产生方法的研究[J]. 中国科技信息, 2011(7):41-43. (WANG Lei, LI Biao. Research on THz wave and its generation method[J]. China Science and Technology Information, 2011(7):41-43.)

作者简介:



徐刚锋(1980-), 男, 江西省临川市人, 博士, 助理研究员, 研究方向为多维信号智能化处理、未制导等. email: gangfengxu@126.com.

张岩(1981-), 男, 山西省永济市人, 博士, 助理研究员, 研究方向为导航、制导与控制.

(上接第 506 页)

- [18] 刘乔,李泽仁,孟坤,等. THz 干涉测量用于障碍物后振动传感的研究[J]. 光子学报, 2011,40(6):916-920. (LIU Qiao, LI Zeren, MENG Kun, et al. Study of Vibration Sensing behind Barriers by Terahertz Interferometry[J]. ACTA Photonica Sonica, 2011,40(6):916-920.)
- [19] 朱礼国. 太赫兹光谱系统及其在载流子动力学研究中的应用[D]. 北京:清华大学, 2011. (ZHU Ligu. Terahertz Spectroscopy and its Applications on Carrier Dynamics in Semiconductor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.)
- [20] ZHU Ligu, TANG Hao, ZHAO Liang, et al. Carrier Dynamics in Si Nanowires Fabricated by Metal-Assisted Chemical Etching[J]. ACS Nano, 2012,6(9):7814-7819.
- [21] Peter H Siegel. Terahertz technology in biology and medicine[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(10):2438-2447.
- [22] 刘乔,李泽仁,孟坤. 太赫兹时域光谱技术用于药品检测[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):283-286. (LIU Qiao, LI Zeren, MENG Kun. Medicine inspection by the terahertz time-domain spectroscopy technique[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):283-296.)

作者简介:



朱礼国(1983-), 男, 四川省绵竹县人, 博士, 美国凯斯西储大学访问学者, 主要从事太赫兹光谱学与成像技术及其应用研究. email: zhuligu@tsinghua.org.cn.

孟坤(1984-), 男, 山东省青岛市人, 硕士, 主要从事太赫兹时域光谱技术及应用研究.

彭龙瑶(1988-), 女, 湖南省娄底市人, 在读硕士研究生, 主要从事太赫兹波调制技术研究.

钟森城(1985-), 男, 广东省梅州市人, 硕士, 主要从事高功率太赫兹源研究.

刘乔(1973-), 男, 四川省泸州市人, 硕士, 主要从事激光干涉测量及太赫兹光谱成像研究.