

文章编号: 2095-4980(2014)03-0351-04

太赫兹技术在军事和航天领域的应用

闵碧波¹, 曾嫦娥¹, 印 欣¹, 马俊海²

(1.北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100012; 2.中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘 要: 介绍了太赫兹波的发展现状及主要特性。重点介绍太赫兹波在军事、航天领域里的应用。尤其是在卫星通信、卫星成像与探测、空间态势感知和导弹防御等方面, 太赫兹波有着很好的发展前景。本文给出太赫兹技术在军事和航天领域的最新进展, 特别是在武器装备测试方面, 太赫兹技术有着广泛的应用前景。文章可为太赫兹技术在军事领域的进一步应用提供技术参考。

关键词: 太赫兹; 航天应用; 综述

中图分类号: TN216

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201403.0351

Application of terahertz techniques in military and space

MIN Bi-bo¹, ZENG Chang-e¹, YIN Xin¹, MA Jun-hai²

(1.Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100012, China;

2.China Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng Jilin 137001, China)

Abstract: The development status and main features of terahertz wave are described. The applications of terahertz wave in the regions of military and space are introduced in emphasis. Terahertz wave has the special application prospects in the aspects of satellite communications, satellite imaging and detecting, space situational awareness and missile defense. The latest progresses of the terahertz technology application in the military and space are presented, especially in the area of weapon test. This article can provide a technology reference for many military applications of terahertz technology.

Key words: terahertz; aerospace applications; overview

太赫兹(Terahertz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$), 是指频率在 $0.1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$, 波长在 $30 \mu\text{m} \sim 3\,000 \mu\text{m}$ 之间的电磁波, 其波段位于微波和红外之间, 属于远红外波段。它是处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段的波。20 世纪 80 年代中期以前, 由于缺乏有效产生和检测太赫兹波的方法, 人们对该频段电磁辐射的性质了解得非常有限, 因此其发展受到了很大限制。近 20 年来, 电子激光器和超快技术的快速发展, 为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源。因此, 太赫兹辐射的物理机理、检测技术和应用技术研究得以快速发展。太赫兹技术之所以引起广泛关注, 是由于物质的太赫兹光谱中包含丰富的物理和化学信息, 在物理成像、环境检测、医疗诊断、射电天文、宽带移动通信和雷达等方面具有重大的科学价值和广泛的应用前景^[1]。

20 世纪 90 年代中期, 美国国家基金会(National Science Foundation, NSF)、国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、能源部(Department of Energy, DOE)和国家卫生学会(NIT)开始对太赫兹技术进行大规模的研究, 其重点国家实验室开展的研究有辐射源、材料、检测、传输器件等研究工作。与此同时, 美国 IBM、Intel 等实验室以太赫兹波在电子学、天文学、航空科学和空间科学的应用为背景进行研究, 特别是太赫兹波在星际间通信、无线电通信、雷达成像等方面的应用进行研究^[2]。2000 年以后, 欧洲主要围绕太赫兹的波段在医疗、通信技术等方面进行研究。2000 年~2003 年, 英国开展的太赫兹发射及探测器无线区网络研究项目, 开发了 $1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$ 的广域半导体器件和检测波, 还开发应用高功率、小型近红外短脉冲激光的小型医用太赫兹脉冲成像装置, 并通过风险企业取得了产业化进展^[3]。法国研究了太赫兹波段信号处理装置。瑞典实现高温超导体和半导体混合的超高速 AD 转换器等。

2005 年, 科技部、中国科学院、国家自然科学基金委联合召开的以“太赫兹科学技术”为主题的科学会议, 成为我国太赫兹研究工作的里程碑。至今, 国内已有 30 多家单位从事太赫兹科学技术研究工作, 正逐渐在国际太赫兹科学技术的研究中占有一席之地。

收稿日期: 2012-11-21; 修回日期: 2014-02-19

1 太赫兹波的主要特性

由于太赫兹在电磁波谱中有着特殊的位置,因此,它有一系列的优越性,而这优越性使其具有很好的应用前景。其主要特性如下:

1) 波粒二相性:太赫兹辐射是电磁波,因此它具有电磁波的所有特性。太赫兹波具有干涉、衍射等波动特性,在与物质相互作用时,太赫兹波显示出了粒子特性。

2) 穿透性:太赫兹波是具有量子特性的电磁波,具有类似微波的穿透能力,同时又具有类似光波的方向性。太赫兹波也可以被特定的准光学器件反射、聚焦和准直,可以在特定的波导中传输。

3) 安全性:相对于X射线有千电子伏的光子能量,太赫兹辐射的能量只有毫电子伏的数量级。它的能量低于各种化学键的键能,因此它不会引起有害的电离反应。这点对旅客身体的安全检查和生物样品的检查等应用至关重要。另外,由于水对太赫兹波有非常强烈的吸收性,太赫兹波不能穿透人体的皮肤。因此,即使强烈的太赫兹辐射,对人体的影响也只能停留在皮肤表层,而不是像微波可以穿透到人体的内部^[4]。

4) 光谱分辨特性:许多有机分子,如生物大分子的振动和旋转频率都在太赫兹波段,所以在太赫兹波段表现出很强的吸收和色散特性。物质的太赫兹光谱(发射、反射和透射光谱)包含丰富的物理和化学信息,使得它们具有类似指纹一样的唯一特点。因此,太赫兹光谱成像技术不仅能够分辨物体的形貌,还能识别物体的组成成分。

5) 很高的时间和空间相干性:太赫兹辐射是由相干电流驱动的偶极子振荡产生,或是由相干的激光脉冲通过非线性光学差频效应产生,因此具有很高的时间相干性和空间相干性。

2 太赫兹波在军事领域中的应用

太赫兹波的频率介于微波与红外之间,因此太赫兹系统兼具电子学系统和光学系统的优势。作为一个尚待开发的频段资源,太赫兹波在军事上,尤其在远程监视及探测、远距离成像、炸药检测和无损检测方面具有潜在的应用前景。

2.1 利用太赫兹进行远程监视及探测

太赫兹辐射具有比微波更短的波长及更高的时间检测精确度,因此,可利用太赫兹雷达对目标进行敏感性的探测与监视。与微波雷达相比,太赫兹可探测到的目标更小,实现的定位更精确。雷达主要是靠接收目标的反射信号来发现目标,如果目标表面能使雷达波被吸收或散射,就可以大大减少被对方雷达发现的概率,从而达到隐形的目的^[5]。一般情况下,用吸波材料做成的隐形目标只适合于一个很窄的波段,所以,常规的窄带微波雷达无法有效探测雷达截面很小的隐形飞机^[5]。太赫兹雷达发射的太赫兹脉冲包含了丰富的频率,可使隐形飞机的窄带吸收涂层失去作用。由于雷达主要用于探测空中目标的方位和距离,而超宽带太赫兹雷达以其高的距离分辨率、强穿透率、低截获率、强抗干扰性以及优越的反隐身能力,完全可用于国家的远程监视与探测^[6]。

2.2 利用太赫兹进行远距离成像

太赫兹成像所依据的原理是:透过成像样品的太赫兹电磁波的强度和相位包含了样品复介电函数的空间分布。将透射太赫兹电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的处理和分析,就能得到太赫兹的图像。

2.3 利用太赫兹检测技术对炸药进行检测与区分

太赫兹辐射对炸药所处的状态非常敏感,温度的不同和晶型的不同都会在太赫兹光谱中有所反映,不同晶向的炸药样品吸收特征也有所差别,可用于炸药精细结构的检测分析。利用太赫兹时域光谱装置测量各种单质化合物的光谱,再采用线性回归的技术,对测量的混合化合物太赫兹谱进行分析,能得到混合材料的成分和相对含量,可用于研究混合炸药在不同状态下的表面组分变化情况^[7]。利用水分子对太赫兹辐射强烈的吸收特性,能够有效地对库存炸药表面水分布的变化情况进行无损检测和评价,为炸药状态的无损评价提供了新的思路和方法。

2.4 利用太赫兹进行无损检测

由于太赫兹波有较强的穿透率,并且其光子能量低,只有几个毫电子伏特,穿透时不易发生电离,因而可用于安全的无损检测。尤其是对一些塑料泡沫等绝缘材料内部的缺陷和裂纹等进行无损检测和成像,在战略导弹及航空、航天结构材料的检测和评估方面具有重要的应用价值。如对航天飞机燃料舱的隔热材料进行有效的无损探伤,已被美国宇航局选择为发射中缺陷检测的技术之一^[8]。

3 太赫兹在航天领域的应用

近年来,美国国防部高级研究计划局对太赫兹波的潜在军用价值非常感兴趣,例如空间目标监视和导弹防御。其主要项目包括:试剂的空气动力学响应特性、太赫兹辐射的现象及特性研究以及亚毫米波长雷达在导弹防御中的应用等。

3.1 太赫兹波用于卫星通信

太赫兹波在通信方面的应用,包括卫星间通信、短程大气通信、短程地面无线局域通信等。太赫兹的星间技术通信数据率可达 25 Gbps~250 Gbps。因为太赫兹波穿透大气层能力差,因此星间通信比较安全,免受地面测控的干扰。另一方面,太赫兹波波束窄,带宽达 100 GHz,因此,可提供的信道数量比较大,很难被敌方实施的电子干扰所欺骗。

3.2 太赫兹用于卫星成像和探测

在卫星成像和探测领域,太赫兹波传感器可实现对目标的高精确度成像,并对目标的材料组成进行光谱分析。太赫兹波的频率很高且脉冲很短,故其空间分辨率和时间分辨率都很高。利用太赫兹技术制造的 CCD(Charge Coupled Device)、望远镜及雷达等传感器可通过其他卫星平台对运行中的卫星进行高精度成像^[9]。例如,假设其工作频率 300 GHz,峰值功率 400 kW,可对 100 km 范围内的所有卫星进行逆合成孔径雷达成像,理论分辨力达 1 mm,图像的距离分辨力大约为 3 cm。另外,在进行空间军事侦查时,采用太赫兹波扫描某空间领域,可以建立空间在轨目标的准确编目并识别卫星的载荷。在导弹防御方面,也可以采用太赫兹波紧密跟踪战略或战术导弹的尾焰,识别出什么时候第二阶段燃料将会用尽。太赫兹雷达分辨率高,将成为未来的高精度雷达发展方向,可以完成远程监视、武器探测以及在战场上显示前方灰尘或烟雾中的坦克等任务。

太赫兹技术还可应用于对固体、液体、气体以及火焰和流体等介质的电、声学性质的研究以及化学组成的表征。通过卫星携带的太赫兹波探测器,可以为气象研究、遥感和环境探测提供有价值的数据和资料。

3.3 太赫兹技术用于航天器的组成材料分析和鉴定

在材料鉴定方面,大多数分子均有相应的太赫兹波段的“指纹”特征谱,研究材料在这一波段的光谱对于物质结构的性质以及揭示新的物质有着重要的意义。太赫兹技术非常适合于用来分析分子,可以通过太赫兹波激发并探测“分子振动旋转状态”来进行光谱分析。它能有效地激发分子进入各种共振模式,使分子振动或转动。在这一过程中,分子吸收能量,在光谱仪中生成某段频率的吸收谱线,然后就可以据此判断出其中含有那些分子。因此,可以使用太赫兹分析他国卫星的组成、结构甚至材料。

3.4 太赫兹用于航天器的无损检测

太赫兹波可用于探测航天器微小损伤和复合材料的脱胶。现在使用的方法很难实现这种无损检测。有的公司用结构小巧的固体太赫兹波系统对航天器外部燃料箱的泡沫隔离层进行空洞(空气泡)和脱胶(两泡沫层间脱离或泡沫层和地板间脱离)检测。美国使用了一套基于光学技术的太赫兹波系统,充分证明了太赫兹波可以对航天器燃料舱的隔热材料进行有效的无损探伤。但为防止光学晶体损坏,该系统需要每隔几小时就关机冷却一次。

3.5 利用太赫兹进行空间态势感知和导弹防御

利用激发产生太赫兹信号,检测物质分子振荡旋转态,再进行光谱分析,可以识别物质的成分。美国军事卫星采用了太赫兹技术,可在几秒内探测到其他国家或私人公司发射的航天器的详细图像信息以及航天器自身和载荷的完整结构、物质成分等数据,并将这些数据传送给地面站。在导弹防御领域,太赫兹可以更好地跟踪弹道导弹的尾焰,精确地识别导弹的第二次点火,提高导弹的预警能力。

4 结论

太赫兹波具有不同于其他波段独特的特性,近年来日益受到科学界的广泛重视。作为电磁频谱中唯一没有获得充分研究的频段,在军事领域有着更加广泛的应用。具体范围涉及军事卫星通信、近距离地面和机载通信,近距离目标分析,空间探测、目标探测和导弹防御等,可以预见在不久的将来,太赫兹技术将和电磁波谱的其他波段一样,给军事和航天领域带来深远影响。

参考文献:

- [1] Wickenden A E, Fazi C, Huebschman B. Spin Torque Nano Oscillators as Potential Terahertz (THz) Communications Devices[Z]. ARL-TR-4807 Army research laboratory, 2009.
- [2] Guy B, Demartinis. 1.56 THz Spot Scanning Radar for Fully Polarimetric W-Band Scale Model Measurements[Z]. Massachusetts University Submillimeter-Wave Technology Laboratory, 2000.
- [3] Tuovinen J. Method for testing reflector antennas at THz frequencies[J]. Journal of Infrared, 1993(11):2-5.
- [4] 左琳琳. 太赫兹应用技术与进展[J]. 装备参考, 2004(35):5-6. (ZUO Lin-lin. Terahertz Technology Research and Development[J]. Equipment Reference, 2004(35):5-6.)
- [5] 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. 红外, 2008(12):3-4. (QI Zhu-min. Application and Research of Terahertz Wave Techniques in Military[J]. Infrared, 2008(12):3-4.)
- [6] 刘盛刚, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5):483-484. (LIU Sheng-gang, ZHONG Ren-bin. The new development of the THz technology and applications[J]. University of Electronic Science and Technology Journal, 2009, 38(5):483-484.)
- [7] 杜宇, 张伟斌, 肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3):289-290. (DU Yu, ZHANG Wei-bin, XIAO Li. The application of THz in the technology of explosives detection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3):289-290.)
- [8] 陈刚, 周小阳, 蒋忠进. 国外太赫兹技术与军事应用研究现状[J]. 国外目标与环境特性管理与技术研究参考, 2010(1):3-4. (CHEN Gang, ZHOU Xiao-yang, JIANG Zhong-jin. Foreign terahertz Technology and military research status[J]. the reference of Foreign target and environment management and technology research, 2010(1):3-4.)
- [9] 李颖, 屈强, 方秀花. 太赫兹技术及其在军事航天领域的应用[J]. 卫星军事应用参考, 2006(5):5-7. (LI Ying, QU Qiang, FANG Xiu-hua. Terahertz technology and its application in the military and space[J]. The reference of satellite military applications, 2006(5):5-7.)

作者简介:



闵碧波(1963-), 女, 成都市人, 高级工程师, 主要研究方向为常规武器试验与鉴定情报. 曾获全军科技进步一等奖 1 项, 三等奖 2 项, email: minbibo@sohu.com.

曾嫦娥(1966-), 女, 长沙市人, 高级工程师, 主要研究方向为常规武器试验总体方面.

印欣(1975-), 女, 长春市人, 工程师, 主要研究方向为仪器仪表计量测试.

马俊海(1973-), 女, 吉林省白城市人, 主要研究方向为常规武器试验技术情报.