

文章编号: 2095-4980(2013)05-0693-09

太赫兹波在遥感技术中的应用探讨

刘 丰¹, 朱忠博¹, 李 栋¹, 尚 社¹, 崔万照¹, 刘江凡², 席晓丽²

(1.西安空间无线电技术研究所 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100;
2.西安理工大学 自动化与电子工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 太赫兹频段是宏观电子学向微观光子学过渡的纽带, 是电磁频谱中最近被开发的频段, 在遥感领域受到了特别关注。介绍了太赫兹频段的技术优势, 以及在天文观测、地球气象观测、目标参数测量、反隐身雷达及探测雷达等领域的发展状况及设想, 探讨了太赫兹雷达在弹道目标探测及空间来袭目标告警等场景下的应用。揭示了太赫兹技术在遥感领域良好的应用前景。

关键词: 太赫兹波; 被动遥感; 缩比雷达散射截面测量; 反隐身雷达; 预警雷达

中图分类号: TN015; P414; P161.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201305.0693

Discussion on terahertz techniques in remote sensing

LIU Feng¹, ZHU Zhong-bo¹, LI Dong¹, SHANG She¹, CUI Wan-zhao¹, LIU Jiang-fan², XI Xiao-li²

(1.Science and Technology on Space Microwave Laboratory, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China;
2.The Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: Terahertz band is the bridge connecting the electrical waves and light waves in electromagnetic spectrum. It is the latest developed band, and attracts much attention in remote sensing field. The advantages of Terahertz wave are analyzed in astronomical observation, metrological observation, target Radar Cross-Section(RCS) measurement, counter-stealth, and detecting radar applications, and their development trends are discussed and envisioned as well. The application of Terahertz radar in the scenes of ballistic target detection and space target alarm are discussed in detail. A good prospect is suggested for the application of Terahertz techniques in remote sensing fields.

Key words: terahertz wave; passive remote sensing; Radar Cross-Section measurement of scaled-model; counter-stealth radar; early-warning radar

太赫兹(THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)频段指频率从 0.1 THz 到 10 THz、波长从 30 μm 到 3 mm 的电磁辐射区域, 是电磁波谱中桥接宏观电子学与微观光子学的特殊频段。物质的太赫兹频段发射、透射和反射频谱包含丰富的物理和化学信息, 凝聚态物质声子频率、大分子振动、转动特征谱均位于太赫兹频段, 半导体中载流子对太赫兹辐射响应非常灵敏, 故太赫兹频段的研究已形成与既有频段的有力互补, 成为探索物质结构, 揭示物理化学过程的新手段^[1-3]。太赫兹频段作为新近关注的探测和信息传输频段, 目前这个领域的研究正在积极开展^[4-7]。特别是在遥感领域, 开展太赫兹频段被动遥感研究, 可以获取更多传统波段难以获得的信息。使用太赫兹波作为雷达载波, 与传统微波雷达相比具有波长短、信号绝对带宽大、纵向分辨力高, 且对相同目标雷达散射截面(RCS)大; 相同天线可以提供更高的增益, 实现窄波束, 获得多目标识别能力和高的横向分辨力, 减少干扰信号注入雷达主瓣波束的几率, 抗干扰性好; 短雷达波对目标微小的多普勒变化更敏感, 对微动目标的测量可以反演出其独特的运动和结构特性。与激光雷达相比: 探测视场更宽, 搜索能力强; 太赫兹波穿透能力强, 可以穿透雾、尘等障碍环境, 实现更广应用领域的探测和成像。

1 太赫兹被动遥感

依据黑体辐射原理, 一切温度高于绝对零度的物体都会产生热辐射, 中低温物体的热辐射主要集中在太赫兹

收稿日期: 2013-04-18; 修回日期: 2013-05-30

基金项目: 空间微波技术国家重点实验室基金资助项目(9140C530404130C53193)

频段,例如从宇宙大爆炸至今,宇宙的背景温度已经降至约 2.73 K,由热辐射理论可知,宇宙射线中太赫兹频段的能量几乎占到宇宙背景辐射总能量的 80%。开展对地球大气太赫兹频段的被动遥感可以获得丰富的辐射信息,可用于获取大气垂直温度、湿度廓线;对深空的太赫兹探测可以获得空间的物理信息、潜在的远地文明和资源信息。目前美国等国已经对太赫兹频段遥感技术建立了测量标准^[8],有望很快在太赫兹遥感中得到推广。

1.1 深空探测

目前深空探测关注的 5 大重点领域包括:月球探测、火星探测、水星与金星探测、巨行星及其卫星探测、小行星与彗星探测^[9],太赫兹频段观测技术将在其中发挥重要作用。

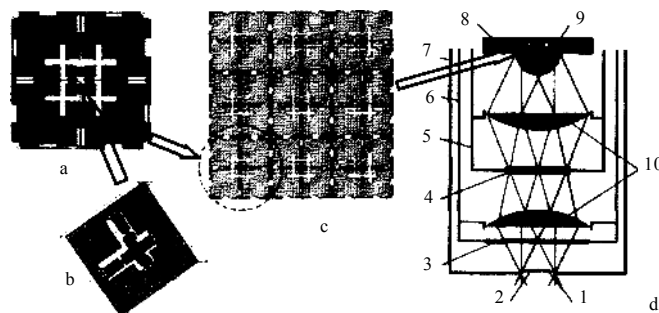


Fig.1 0.13 THz–0.38 THz array radiometer
图 1 0.13 THz–0.38 THz 辐射计阵列示意图

由多国参与的规模庞大的地面天文太赫兹探测计划如阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA) 计划正在实施,其工作频段为 0.3 THz–0.95 THz,空间分辨力达 0.01",用于超高空间分辨率对宇宙暗区观测和成像^[10]。俄罗斯科学院研究了频段在 0.13 THz~0.38 THz 的探测器阵列^[11],用于构建全谱段的天文观测体系,见图 1, a 为单像元, b 为辐射热计芯片, c 为 3×3 探测器阵列, d 为接收部件光学匹配结构, 1 为入射窗, 2 为望远镜像平面, 3 和 4 为 40 K 和 4 K 温度的低损耗红外射线窗, 5 和 6 为 4 K 和 40 K 的热屏, 7 为低温腔体, 8 为 0.3 K 制冷机底, 9 为位于椭圆透镜焦点的接收天线阵, 10 为硅非球面透镜。探测器为热电子超导辐射热计,噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP) 可低于 $10^{-18} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。中国空间技术研究院、中科院紫金山天文台等单位完成了 0.5 THz 的相干太赫兹探测系统,灵敏度达到 8 倍量子极限,前端实时带宽可达 0.16 THz。

由于地球大气对太赫兹频段衰减极大,人们更加关注天基太赫兹观测,目前已有许多在轨运用的太赫兹载荷。

2004 年,欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 的 Rosetta 深空探测卫星发射升空,该卫星携带多种科学探测载荷,其中包括 1 台 562 GHz 的频谱探测器。Rosetta 卫星将飞往彗星 Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko 并穿越彗尾,研究彗星挥发物质,包括水汽、一氧化碳、氨、甲醇的含量,并通过特征谱线的多普勒频移,定量分析挥发物质从彗核逸散的速度^[12]。

同年,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射了 Aura 对地观测卫星,其搭载的 2.5 THz 临边探测载荷可以用于对地球大气中 OH 根离子、臭氧、氯化化合物等成分的浓度和分布进行探测成像^[13]。

2009 年,ESA 的 Herschel 卫星发射升空前往地日拉格朗日 L2 点,携带的主要载荷包括一台频率覆盖 450 GHz~5 THz 的高分辨率外差频谱仪 (Heterodyne Instrument for the Far Infrared, HIFI),使用低噪声超导–绝缘–超导 (Superconductor–Insulator–Superconductor, SIS) 探测器和热电子辐射热测量计 (Hot Electron Bolometer, HEB) 混频器,用于对深空进行宽频段的探测^[14],见图 2。与地面探测设备相比,由于没有大气的干扰,可以获得更远的探测距离和更高的分辨力。

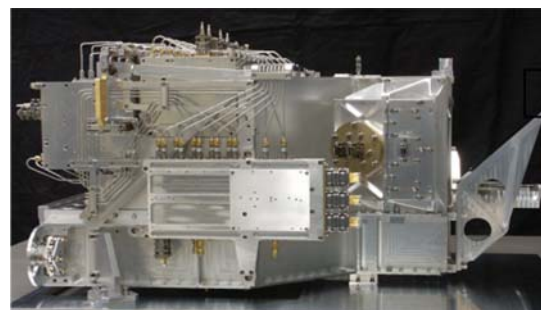


Fig.2 HIFI payload on Herschel satellite
图 2 Herschel 卫星搭载的 HIFI 载荷

1.2 气象观测

在地球气象观测中为了获得高分辨率数值预报,必须借助于卫星观测网来提供相适应的高时间分辨率和高空间观测资料,包括大气的温度和湿度的垂直分布及有关图像资料。

现有的气象载荷主要为微波辐射计、散射计及红外成像仪,然而经验表明,红外探测通道难以提供诸如锋面结构、气旋生成、强对流等天气现象的信息,而传统微波探测通道却可能直接穿透主要大气活动区域,不能够精细观测云层内部气象条件的变化。太赫兹波作为微波和红外的中间波段,兼具有微波穿透性好和红外分辨力高的特点,设置多个太赫兹频段的通道,可以得到大气垂直分布的精确信息。

在 0.001 THz~1 THz 频段,大气中主要吸收气体是水汽(H₂O)和氧气(O₂)。通过对氧气吸收谱线的测量,可反演大气温度的垂直分布廓线;通过对水汽吸收谱线的测量,可反演大气湿度的垂直分布廓线。1 THz 以下,有 3 条较强的氧气吸收线,分别在 0.057 29 THz,0.118 75 THz 和 0.424 76 THz,并有 0.183 31 THz 和 0.380 2 THz 两条较强的水汽吸收线。另外,0.089 THz,0.11 THz,0.15 THz,0.22 THz 和 0.34 THz 等都是较理想的窗区通道,可用于进行地表降水和水汽含量的探测^[15]。目前各国气象辐射计都设置了 0.183 THz 通道,例如美国的先进技术微波辐射计(Advanced Technology Microwave Sounder, ATMS)(见图 3^[16]),2 幅天线分别用以接收 0.023 8 THz~0.06 THz 频段和 0.089 THz~0.183 THz 频段。

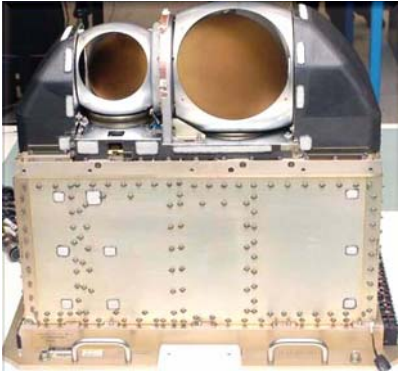


Fig.3 US Advanced Technology Microwave Sounder(ATMS)
图 3 美国 ATMS 辐射计

2 缩比雷达散射截面(RCS)测量

目标 RCS 是武器系统研制中的关键技术指标,对雷达系统设计、目标识别、跟踪点选择和隐身技术具有重要的指导意义。一般的,理论计算不能精确获得目标 RCS,故 RCS 的测量是雷达技术中非常重要的研究内容。

随着太赫兹波应用于雷达,太赫兹频段目标 RCS 测量受到关注;此外,太赫兹波用于大型目标在传统雷达波段的缩比 RCS 测量^[17]也是非常有价值的研究方向。

对于大型目标,可通过电磁缩比测试方式获得目标 RCS。缩比模型测量需要应用缩比定律,一般测量使用的缩比模型均为金属制品,缩比测量依据理想导体缩比定律^[18],当对波长的平方进行归一化,若 2 个理想导体目标具有相同形状、相同波数,仅尺寸不同,则它们的 RCS 方向图完全相同。

近年来,随着雷达探测频率不断提升以及对大型目标(如战舰和战略轰炸机等)的 RCS 缩比测量的需求,RCS 缩比测量系统的工作频率将达到太赫兹频段甚至太赫兹频段的高频端。太赫兹缩比模型 RCS 测量可大幅节约微波波段全尺寸目标 RCS 测量成本,缩短测量周期。缩比模型测量结果通过频率缩比计算,可用于微波波段全尺寸目标 RCS 评估。例如要测试获取 300 m 尺度的大型舰船在厘米波段(例如 0.016 THz)的 RCS,按照缩比系数 1:150 制作尺寸为 2 m 的缩比舰船模型开展测试,则缩比测试频率为 2.4 THz,若要获得舰船在毫米波段的 RCS(例如制导雷达工作情形),则需要更高的缩比测试频率。典型雷达目标缩比关系见表 1。

表 1 典型目标电磁缩比关系
Table1 Electromagnetic scaling relationship of typical targets

targets	scale/m	radar frequency/GHz	minification	model scale/m	testing frequency/THz
tank	10	3(S band)	1:20	0.5	0.06
		8(X band)			0.16
aero plane	25	3(S band)	1:50	0.5	0.15
		8(X band)			0.40
		3(S band)			0.45
large surface ship	300	8(X band)	1:150	2.0	1.20
		16(Ku band)			2.40
		35(Ka band)			5.25

针对电磁缩比测试的需求,有 2 种较为常用的太赫兹测量系统方案:一种是使用连续太赫兹波源(包括相干激光差频或信号发生器)的单频点 RCS 测试系统,另一种采用在频谱测量领域已经成熟的太赫兹时域频谱技术(THz-TDS)平台进行宽带同步 RCS 测量。目前不同的研究机构已经开展了平板^[19]、标准几何模型^[20-22]、武器模型^[23-24]的 RCS 研究。例如 2010 年丹麦技术大学利用飞秒激光泵浦的 THz-TDS 平台进行了 1:150 的飞机金属模型 RCS 测量,获得了该模型水平、垂直转动的频率平均 RCS 方位图和 0.3 THz,0.7 THz 和 1.1 THz 三频点的 RCS 方位图,分别模拟了 0.002 THz、0.004 7 THz、0.007 3 THz 三个微波波段雷达 RCS 测量结果^[23],见图 4。国内天津大学、原航天工业总公司下属单位也开展了该领域研究工作。

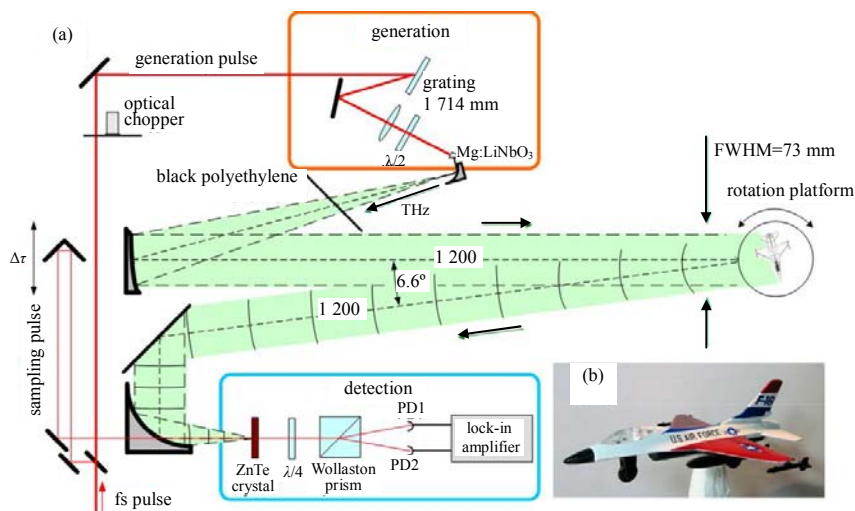


Fig.4 Layout of RCS measurement facility for scaled models

图 4 缩比 RCS 测量装置及金属模型示意图

3 太赫兹反隐身雷达

隐身技术在现代军事对抗中发挥着越来越重要的作用,具备隐身特性的装甲车辆、飞行器及水面战斗舰艇具有很好的反搜索和反跟踪性能,在隐蔽自身的同时可以给予敌方出其不意的打击。隐身技术包括无源隐身技术和有源隐身技术,已对现有雷达技术构成严重挑战。研制新型反隐身雷达成为非常紧迫的课题,太赫兹雷达技术有望在反隐身领域发挥独特作用。

3.1 太赫兹反无源隐身技术

无源隐身技术主要利用外形设计或为目标覆盖吸波材料、透波材料的方法减弱敌侦察系统雷达回波能量。

使用隐身外形设计,平滑的外表可以有效降低角反射效应,且对于一般窄带雷达来说,这种设计使得目标的 RCS 处于光学区,数值稳定,不存在谐振效应,有效地对抗了该波段雷达系统。但对于宽带太赫兹雷达来说,大带宽、窄脉冲极大地提高了分辨力,探测目标的模型将不再是一个点模型,而变为分布式模型,其隐身外形将难以使电磁波“爬过”其表面,故而这种技术在太赫兹技术面前不会显示隐身效果。

材料隐身利用某些特定材料对入射电磁波会产生很大的电磁损耗、高频介质损耗和磁损耗的原理,或利用合适厚度涂层造成入射—反射波相干相消起到回波抑制作用。由于涂料都是窄带选择性吸收,故在超宽带太赫兹雷达波面前不具备设计的隐身特性;另一方面,大部分隐身材料为具有弛豫效应的铁氧体吸收材料,利用磁壁共振和磁畴旋转共振引起电磁波损耗,而共振的建立需要一定时间,对于超短的太赫兹脉冲(可工作在 ps 量级脉冲宽度),共振无法建立,故涂层无法吸收太赫兹雷达波能量,可以起到反隐身作用。

3.2 太赫兹反等离子体隐身技术

等离子体具有对电磁波吸收和折射的作用。1992 年美国首次提出等离子体折射隐身概念^[25],通过非均匀等离子体对入射电磁波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲,回波偏离对方雷达的接收方向,从而使之不能探测到目标准确位置。吸收隐身利用的是等离子体通过对入射到其中的电磁波发生碰撞,吸收其大部分能量,使得雷达回波最小来实现隐身。

等离子体实现电磁隐身与其介电特性有关,在非磁化冷等离子体中,相对介电系数 ε_r 表示为:

$$\varepsilon_r = n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - i \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (1)$$

式中: ω 为载波频率; ω_p 为等离子体频率,也称为朗缪尔频率; ν 为碰撞频率。式(1)反映了等离子体与电磁波相互作用关系。可以看到等离子体具有高通滤波器特性,当雷达波频率低于等离子体频率时,电磁波电场对自由电子做功,把一部分能量传给电子,而自身能量被衰减,电子通过与其他粒子的有效碰撞,把能量转化为无规则运动消耗掉,故电磁波在传播方向上按指数衰减,损耗很大^[26]。假设等离子体层参数^[27]: 电子密度 $n_e = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 $\nu = 10 \text{ Grad/s}$, 等离子体层厚度分别为 1 cm 和 10 cm , 目标本身为良导体理想反射体,仿真得到穿透等

离子体层并反射输出的功率谱见图 5, 可见在现有雷达波段, 等离子体损耗非常大, 目标可以实现理想的隐身效果, 但当使用太赫兹频段电磁波作为雷达载波, 可以避免共振吸收等效应, 例如在 0.16 THz 处, 即使对 10 cm 厚的等离子体层, 雷达波往返损耗也小于 5 dB, 等离子体层在太赫兹雷达面前透明度提高, 实现了反等离子体有源隐身。

4 太赫兹雷达应用技术

太赫兹雷达的研究受到各国重视。美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 使用全固态器件的太赫兹雷达系统工作在 0.12 THz~0.67 THz 多个频点, 采用扫描成像模式, 可获得亚厘米级的分辨力^[28], 德国应用科学研究所的 COBRA ISAR 雷达工作频率 0.22 THz, 带宽大于 0.008 THz, 采用调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 调制, 分辨力优于 2 cm^[29], 日本采用异步电光采样方式的太赫兹脉冲雷达充分利用短脉冲特性使距离分辨力达到 0.5 mm^[30]。中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心的 0.67 THz ISAR 系统, 带宽超过 0.028 THz, 横向分辨力优于 1.3 cm^[31]。太赫兹雷达在多种武器平台的应用往往受地面大气 (特别是水汽的强吸收) 的限制, 而空间环境应用避免了这个问题, 太赫兹雷达可以充分发挥其高分辨优势, 在反导预警体系建设和航天器自身防御探测方面显示出良好应用前景。

4.1 太赫兹雷达侦测弹道目标

随着战争的需要, 人类战场已经延伸到太空。远程弹道导弹射程远, 速度快, 飞行中段高速穿越近太空, 可携带核弹头, 破坏能力强。针对弹道战略武器的防御体系^[32]中非常重要的部分为实现探测和跟踪的预警系统。

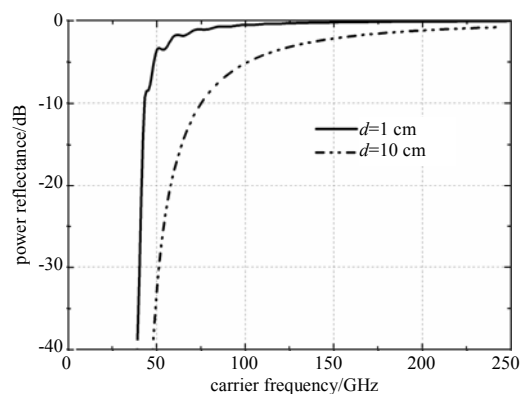


Fig.5 Power reflectance from an idea reflecting surface covered with plasma layer

图 5 覆盖等离子体层的目标电磁反射谱



Fig.6 Schematic of ballistic target in flying course

图 6 弹道目标飞行阶段示意图

弹道导弹的飞行过程分为主动段、中间段和再入段, 见图 6, 现有的导弹预警体系, 主要使用地基雷达发现主动段起飞的目标, 同时使用天基光学敏感器探测主动段高层的火箭尾焰, 但是当导弹进入飞行中间段, 弹箭分离, 弹头红外特征降低, 同时导弹释放出许多干扰目标作为诱饵与真实弹头按照同样速度和轨迹飞行, 极大提升了突防概率。故提高中间段探测概率和目标跟踪、识别能力, 是提升预警能力的关键。

对中间段目标的高效跟踪, 需要高精度的雷达系统, 地基雷达受限于其视线角, 难以进行更长航段的跟踪, 同时雷达波受地球大气衰减作用, 对空间目标的探测距离受限; 使用天基太赫兹雷达进行跟踪, 可以拓展跟踪范围, 同时避免大气层的影响, 短的雷达载波带来更高的分辨力, 可以降低漏警率。

中间段预警面临的另一方面重要问题是诱饵的干扰, 诱饵有多种形式, 主要分为轻诱饵和重诱饵, 轻诱饵包括悬浮颗粒、金属箔片、金属丝、箔条、喷涂金属薄膜的碳布气球等, 重诱饵也称假弹头或假目标, 具有与真弹头相似的外形和雷达散射特征。

轻诱饵依照外形和空气动力学的差别,可以通过雷达散射特性的差异来区分,最迟也可以在再入阶段通过大气的作用来筛选。重诱饵是最危险的威胁,必须在中间段利用技术手段进行有效的区分。真假弹头虽然外形相同,但是实际上其质量和质量分布具有很大差异,这就造成了其运动状态的差异,同时真弹头为实现对目标的鉴别和攻击还要进行一系列特征机动,这都是假弹头不具备的,这些特征也成为使用雷达区分真假目标的判据。真假弹头的运动差别见表 2。

表 2 真假弹头运动差别

Table2 Difference of movements between real warhead and false warhead

motion states	reasons	motion characters	limitations of traditional radar
free rotation ^[33]	uncertainty of warhead ejection	different rotation parameters caused by different mass distribution and different dynamics	limited resolution due to long radar wave
attitude adjustment	warhead radar scanning attitude adjustment for re-entry	keeping tail end pointing to the earth, decelerating and nose pointing to the earth	attitude aliasing by limited resolution, trajectory aliasing by limited resolution

真假弹头之间以及真弹头本身的主体和非刚体振动、转动部件回波信号混叠在一起,低分辨率雷达不能用于提取其结构特征。太赫兹频段的宽带雷达对目标回波中微小的多普勒变化更为敏感,对微动目标的测量可以反演出其独特的运动和结构特性^[34],例如弹头细微的自旋现象以及进动动作。由于多普勒频移反比于雷达波长,对于同样幅度的自旋,太赫兹频段产生的多普勒频移约为 X 频段的 20 倍以上,这样便能够从微动目标多个时刻的宽带雷达成像结果中获取其姿态和结构信息。另一方面,太赫兹频段逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)的成像分辨率远高于微波雷达,直接使用太赫兹雷达对目标进行成像,可以得到目标三维信息,这样便可直接解读出目标的姿态,通过对其特殊的姿态的判读从众多目标中区分出真弹头,提升了预警系统的作战效能。

4.2 太赫兹雷达用于飞行器防御告警

伴随着人类航天活动的剧增,空间环境日益复杂。数量迅速增长的空间碎片已对航天器安全构成严重威胁。空间碎片按来源分为微流星体和人造空间碎片,按尺寸可分为 3 类^[35]: a) 大空间碎片,尺寸在 10 cm 以上,若与其撞击将对航天器造成毁灭性打击,这类碎片已可实现地面监控和编目; b) 小空间碎片,尺寸小于 1 mm,无法进行有效监控,只可进行采样监测,这种监测方式不具备时效性,只有通过特殊的防护措施才可有效提高航天器抗御能力; c) 中等空间碎片,典型尺寸为 1 mm~10 cm,典型质量 1 mg~1 kg,其危险性介于前两者之间,无法进行地基探测,航天器本身的加固防御也不足以抗御。据统计,目前尺寸大于 1 mm 的空间碎片总数已超过 4 000 万个,面对数量如此巨大的危险碎片,地基探测等远程探测手段从探测能力和监控处理能力上都不能满足实际需要,设法研究天基直接探测技术是实现卫星主动规避风险的有效手段。

此外,卫星本身也渐渐成为敌方直接攻击的目标。近年来用于攻击卫星的动能拦截武器(Kinetic Kill Vehicle, KKV)得到迅速发展(其示意图见图 7),它们使用自身高速飞行带来的动能撞击杀伤目标,体积小,机动性高,效益比爆炸性攻击武器还高^[36],对卫星的生存造成重大威胁,及早发现来袭的 KKV 是卫星在战场环境生存必须解决的问题。地面监控设备对体积小、速度快、机动性强的 KKV 武器难以做到及时准确的定位,必须发展卫星主动探测技术满足卫星防御需求。

使用星载雷达可进行目标探测和告警,使用频率更高的太赫兹雷达更可提高卫星在来袭威胁下的生存几率。虽然太赫兹雷达在地面应用还存在一些限制,但是在空间中,由于没有大气吸收环境,便可以充分发挥其优势。

假设脉冲雷达参数为载波 0.3 THz,发射脉冲峰值功率为 5 MW,带宽 1 GHz,发射-接收天线直径为 300 mm,探测灵敏度-84 dBm(300 K)^[37-40],对于一枚典型直径为 30 cm 量级的 KKV 动能弹^[41],太赫兹雷达预警距离可达到 100 km 量级,提供反应时间达到 10 s 量级。结合航天器平台处理能力和机动性能的提升,可以极大提高对抗能力。

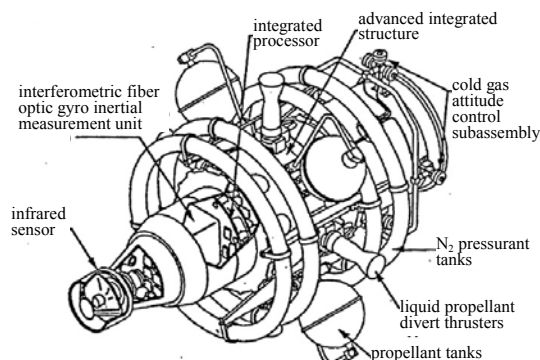


Fig.7 Schematic of KKV interceptor
图 7 KKV 拦截器示意图^[41]

5 太赫兹遥感技术发展趋势

随着遥感需求的牵引以及太赫兹技术的推动,太赫兹频段遥感技术呈现以下趋势:

1) 观测通道数增加,通道更加细分。对于气象观测和物质检测,被观测物在太赫兹频段具有丰富的信息,例如其微观运动特性及能级特性,反应在频谱上可以作为辨识物质的指纹信息,未来将会在更高频段产生许多新的关注通道,并且通道间隔会更加细微,以获取更加全面细致的信息。

2) 太赫兹宽带并行测量。得益于飞秒激光技术,宽带太赫兹波源可以实现数个 THz 带宽的信号,并且电光采样相干探测技术可以实现宽带信息的同步测量。随着宽带太赫兹源进一步普及,可以在宽带、多频点雷达 RCS 测量及反隐身探测雷达领域发挥更加突出的优势。

3) 太赫兹空间探测应用增加。太赫兹技术在地面受大气吸收的影响,有限的辐射功率与强烈的吸收形成尖锐矛盾,限制了太赫兹技术的推广;而在空间环境中,由于不存在吸收介质,性能有限的太赫兹器件及系统也可以充分发挥其效能,故可以预见,未来太赫兹遥感技术首先实现应用的领域应该是空间科学探测及防御探测技术领域。

4) 太赫兹雷达系统向小型化、轻量化发展。传统的太赫兹系统,依赖复杂的太赫兹波源和探测设备,例如庞大的同步加速器、气体激光器、多级抽运的飞秒激光器以及具有致冷部件的低噪声探测器,系统稳定性、可维护性及便携性都受到极大限制,未来将充分发展片上集成工艺,研究集成太赫兹功率源、混频器、传输线、移相器、天线阵及探测器的片上系统,以降低体积功耗,提高系统可靠性及经济性。

同时也应该认识到,高效高功率的辐射源、低损耗的传输馈送、宽工作温度的灵敏探测器正是目前严重阻滞太赫兹技术发展的瓶颈,只有首先突破这些底层关键技术,才能实现太赫兹技术广泛应用与发展。

6 结论与展望

太赫兹频段是遥感领域的重要关注频段。进行太赫兹频段的探测,可以获得大量与传统电磁频段互补的信息,便于展示被观测目标的全貌。太赫兹作为一个新近被开发的频段,可以使传统频段对抗方式失效,发挥独特的攻防效益。太赫兹技术在雷达探测及雷达参数测量中具有特殊的优势,随着雷达系统对高分辨率、多信息获取的需求,雷达波频率必将向太赫兹频段不断推进,结合太赫兹系统小型、轻量、低功耗的优势,太赫兹雷达有望在空间安全体系建设等方面发挥更加广泛的作用。

参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature photonics, 2007,1(2):97-105.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [3] 赵自然,王迎新. 便携式太赫兹时域光谱仪的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):57-61. (ZHAO Ziran, WANG Yingxin. Development of a portable terahertz time-domain spectrometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):57-61.)
- [4] 戚组敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. 红外, 2008,29(12):1-4. (QI Zumin. Study of application of THz wave in military field[J]. Infrared, 2008,29(12):1-4.)
- [5] 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(II)[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 Microwaves, 2011,27(1):1-5.)
- [6] 戴宁,葛进,胡淑红,等. 太赫兹探测技术在遥感应用中的研究进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):231-237. (DAI Ning, GE Jin, HU Shuhong, et al. The development of the terahertz detection techniques in the applications of remote sensing[J]. Journal of CAEIT, 2009,4(3):231-237.)
- [7] 林长星,陆彬,王成,等. 基于 802.11 协议的 0.34 THz 无线局域网实验系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):12-15. (LIN Changxing, LU Bin, WANG Cheng, et al. 0.34 THz wireless local area network demonstration system based on 802.11 protocol[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):12-15.)
- [8] Randa J, Gerech E, Walker D K, et al. Standard development for remote sensing at microwave and terahertz frequencies[C]// International Conference on Measurement and Metrology(ICMM-2007). Logan, UT:[s.n.], 2007:33-42.
- [9] 欧阳自远,李春来,邹永料,等. 深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J]. 中国航天, 2002(12):28-32. (OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, ZOU Yongliao, et al. Progress of deep space exploration and Chinese deep space exploration stratagem[J].

- Aerospace China, 2002(12):28–32.)
- [10] Casassus S, van der Plas G, Sebastian Perez M, et al. Flows of gas through a protoplanetary gap[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 191–194.
- [11] Vystavkin A N, Shitov S V, Bankov S E, et al. High sensitive 0.13–0.38 THz TES array radiometer for the Big Telescope Azimuthal of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences[C]// Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 2007 and the 2007 15th International Conference on Terahertz Electronics. IRMMW–THz. Cardiff:[s.n.], 2007:117–118.
- [12] Chattopadhyay G. Terahertz antennas and systems for space borne platforms[C]// IEEE Proceedings of the fourth European conference on antennas and propagation(EuCAP). Barcelona, Spain:[s.n.], 2010:1–7.
- [13] Mueller E R, Henschke R, Robotham W E, et al. Terahertz local oscillator for the Microwave Limb Sounder on the Aura satellite[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22):4907–4915.
- [14] Thijs de Graauw, Nick Whyborn, Frank Helmich, et al. The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared(HIFI): instrument and pre-launch testing[EB/OL]. [2012–12–28]. http://herschel.esac.esa.int/Publ/2008/SPIE2008_HIFI_paper.pdf.
- [15] 陈洪滨. 利用高频微波被动遥感探测大气[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2):49–54. (CHEN Hongbin. Remote sensing of the atmosphere with the millimeter and sub-millimeter wave radiometry from the space[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(2):49–54.)
- [16] Liu X, Kizer S, Barnett C, et al. Retrieving Atmospheric Temperature and Moisture Profiles from NPP CRIS ATMS Sensors Using Crimss EDR Algorithm[C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). Munich:[s.n.], 2012:1956–1959.
- [17] 李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6):1–8. (LI Qi, XUE Kai, LI Huiyu, et al. Advances in research of terahertz radar cross section measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6):1–8.)
- [18] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 3rd Edition. New York: McGraw–Hill Companies, 2008.
- [19] Jansen C, Krumbholz N, Geisb R, et al. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements[C]// 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Busan:[s.n.], 2009:1–2.
- [20] McGowan R W, Chevillat R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Techn.*, 2000, 48(3):417–418.
- [21] Coulombe M J, Ferdinand T, Horgan T, et al. A 585 GHz compact range for scale model RCS measurements[C]// Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association. Bethesda:[s.n.], 1993:129–134.
- [22] 杨洋, 姚建铨, 宋玉坤, 等. 球形目标在不同波段的雷达散射截面[J]. 激光与红外, 2011, 41(5):552–554. (YANG Yang, YAO Jianquan, SONG Yukun, et al. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5):552–554.)
- [23] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25):26399–26408.
- [24] Goyette T M, Dickinson J C, Gorveatt W J, et al. X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact range[C]// Proceeding of the SPIE, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XI. Bellingham, WA:[SPIE], 2004(5427):227–236.
- [25] Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasmas[R]. AD-A250710, 1992.
- [26] 杨玉明, 王红, 谭贤四, 等. 太赫兹雷达反等离子体隐身研究[J]. 雷达科学技术, 2012, 10(5):486–491. (YANG Yuming, WANG Hong, TAN Xiansi, et al. Research on anti plasma-sheath performance of THz radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2012, 10(5):486–491.)
- [27] Marini J W. On the decrease of the radar cross section of the Apollo command module due to reentry plasma effects[R]. NASA-TN-D-4784. USA: Goddard Space Flight Center, 1968.
- [28] 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.
- [29] Essen H, Wahlen A, Sommer R, et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(20): 1114–1116.
- [30] Kabetani Y, Yokoyama S, Yasui T. Real-time, terahertz impulse radar based on asynchronous optical sampling[C]// 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Pasadena, CA:[s.n.], 2008:1–2.

- [31] 成彬彬,江舸,陈鹏,等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):7-11. (CHENG Binbin, JIANG Ge, CHEN Peng, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):7-11.)
- [32] Watson J, Zondervan K. The missile defense agency's space tracking and surveillance system[C]// Proc. of SPIE, 2008:710617.
- [33] 袁仕继,许世平,博远. 中段翻滚目标运动建模及其宽带雷达回波仿真[J]. 信息与电子工程, 2011,9(1):33-38. (YUAN Shiji, XU Shiping, BO Yuan. Motion modeling and wideband radar echo simulation for midcourse rolling target[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(1):33-38.)
- [34] GAO Hongwei, XIE Liangui, WEN Shuliang, et al. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010,46(4):1969-1982.
- [35] 王若璞. 空间碎片环境模型研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2010. (WANG Ruopu. Research on space debris environment model[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010.)
- [36] 万自明,陈定昌,殷兴良. 大气层内飞行的 KKV 关键技术分析综述[J]. 系统工程与电子技术, 1999,21(10):1-5. (WAN Ziming, CHEN Dingchang, YIN Xingliang. Analysis of Key Problems to Endo-Atmospheric KKV[J]. System Engineering and Electronics, 1999,21(10):1-5.)
- [37] Steer B, Roitman A, Horoyksi P, et al. High power millimeter-wave Extended Interaction Klystrons for ground, airborne and space radars[C]// IEEE 2009 Radar Conference. Pasadena, CA: [s.n.], 2009:1-3.
- [38] Karpov A, Blondel J, Lazareff B, et al. Millimeter and submillimeter SIS mixers with the noise temperature close to the quantum limit[C]// Proceedings of the Fifth International Symposium on Space Terahertz Technology. Michigan: [s.n.], 1994:73-83.
- [39] 刘丰,朱忠博,崔万照. 空间太赫兹信息技术展望[J]. 微波学报, 2013,29(2):1-6. (LIU Feng, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao. Prospects on Space THz Information Techniques[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(2):1-6.)
- [40] Lee Y S. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照,李韵,史平彦,等译. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [41] Webber T, Flint K. Ground testing kinetic energy projectiles for the Lightweight Exo-Atmospheric Projectile (LEAP) Program[C]// AIAA 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV: [s.n.], 1992.

作者简介:



刘 丰(1984-), 男, 西安市人, 工学博士, 工程师, 主要研究方向为空间微波、太赫兹-亚毫米波技术和空间网络技术等. email: liuhvst@126.com.

尚 社(1964-), 男, 陕西省汉中市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波遥感系统.

刘江凡(1985-), 男, 江西省安福县人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场数值计算.

朱忠博(1980-), 男, 山东省德州市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间太赫兹技术和太赫兹器件技术等.

李 栋(1983-), 男, 西安市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间微波遥感.

崔万照(1975-), 男, 山东省潍坊市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间微波特殊效应、左手材料和太赫兹技术等.

席晓丽(1967-), 女, 西安市人, 博士, 教授, 主要研究方向为计算电磁学、天线设计及阵列信号处理等.