

文章编号: 2095-4980(2013)06-0857-10

## 太赫兹技术在空间领域应用的探讨

刘 丰<sup>1</sup>, 朱忠博<sup>1</sup>, 崔万照<sup>1</sup>, 刘江凡<sup>2</sup>, 席晓丽<sup>2</sup>, 钟 凯<sup>3</sup>, 姚建铨<sup>3</sup>

(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; 3.天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 太赫兹频段介于红外光波与毫米波之间, 是电磁波谱中的重要频段。太赫兹技术已在空间领域展示出良好的应用前景。通过空间太赫兹频段观测可以获得丰富的气象信息、大气信息和深空科学信息。基于太赫兹链路的高频段通信有望突破等离子体黑障的限制, 实现无中断的测控通信; 高速率小型化的太赫兹通信终端是实现卫星网络的理想选择。太赫兹雷达在航天器自身防御及空间弹道目标预警领域将显示出独特的优势与价值。

**关键词:** 太赫兹; 空间探测; 黑障; 空间网络; 太赫兹雷达

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0857

## Application of Terahertz techniques in space science

LIU Feng<sup>1</sup>, ZHU Zhong-bo<sup>1</sup>, CUI Wan-zhao<sup>1</sup>, LIU Jiang-fan<sup>2</sup>, XI Xiao-li<sup>2</sup>, ZHONG Kai<sup>3</sup>, YAO Jian-quan<sup>3</sup>

(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; 3.College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Terahertz band is located between infrared and millimeter wave in the electromagnetic spectrum, which shows a good application prospect in space science and technology. Meteorological, atmospheric and deep space information can be obtained by space borne terahertz observation. It is expected to realize TT&C without radio blackout interruption with terahertz link. Terahertz band is also the optimal choice for realizing space network. Space borne radar systems in terahertz band are useful in self-defense early-warning and midcourse ballistic targets tracking and surveillance.

**Key words:** Terahertz; deep space observation; blackout; space network; Terahertz radar

太赫兹(1 THz=10<sup>12</sup> Hz)频段是指频率从 0.1 THz~10 THz、波长从 3 mm~30 μm 的电磁辐射区域, 它正好介于毫米波与红外光波之间, 是科研工作者最新研究和开发的一个频段。由于太赫兹波位于宏观电子学与微观光光学的过渡区, 决定它具有许多优异的特性。物质的太赫兹波段频谱, 包括发射、透射和反射频谱包含丰富的物理和化学信息, 凝聚态物质的声子频率、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, 故太赫兹波段的频谱研究已经成为探索物质结构、揭示新的物理过程的有效研究手段。太赫兹波在研究成像、通信、遥感和空间科学等领域也具有有良好的应用前景, 是近年来科技界格外关注的一个电磁波段。太赫兹波至今才进行大规模研究和利用, 主要受限于 2 个原因: 1) 缺乏有效的功率源和灵敏的探测器。现在可获得的太赫兹波段波源输出功率一般比传统微波段波源低 1~2 个数量级, 探测部件往往也需要复杂的致冷设备来降低噪声。2) 传输损耗过大。一方面受加工工艺在亚毫米尺度的限制, 难以实现高效率的传输线<sup>[1-2]</sup>; 另一方面, 太赫兹波段在大气中传输损耗过大<sup>[3-5]</sup>, 也明显限制了信号的传输距离。尽管如此, 随着技术的推动, 太赫兹已在各领域开始得到应用, 特别是在空间科学技术领域, 正在进行广泛的应用研究。

### 1 空间科学探测中的太赫兹技术

伴随着科学技术的进步, 人类已经将科学探索的领域从自己生存的地球转向浩渺的宇宙, 同时从外太空的视

角来重新认识地球。探索和开发空间资源,需要掌握大量空间信息。从最早的地面目视光学观测、射电天文探测至今,随着空间技术的进步,使用卫星搭载科学载荷,在太空进行全新视角的观测,并不断扩展频段,在红外和微波之间,开展太赫兹频段的观测,获得了大量有价值的科学资料。

### 1.1 对地大气观测

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分辨率的时间和空间观测资料。

传统的天基对地遥感载荷为红外相机和微波辐射计。红外探测通道可以对地面或云顶成像,但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。辐射计是一种被动式遥感载荷,通过接收被观测场景辐射的微波能量来探测目标特性。辐射计天线主波束指向地面,接收地面辐射、地面散射和大气辐射等辐射流量,引起天线视在温度的变化,进而确定所观测目标的亮温度,该温度值包含了辐射体和传播介质的物理信息。具有全天候、全天时的对地观测能力,能够获取大气温度、湿度、水汽、降雨量、海冰分布等地表、海洋和大气的重要信息,是气象卫星、海洋卫星和对地观测卫星的重要遥感载荷,在天气预报、军事气象海洋保障、强对流灾害天气监测等方面发挥了巨大作用。但是传统微波探测通道可能直接穿透主要大气活动区域,不能够细致观测云层内部气象条件的变化。

太赫兹亚毫米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率高的特点,设置多个亚毫米波段的通道,可以得到大气垂直分布的精确信息。

近来辐射计的工作频段已经扩展到太赫兹频段,有利于避开频率越来越高的地面和空间通信的干扰信号;另一方面,在更大的频带宽度里通过细化探测通道,可以更加细致地了解探测对象的物理特性,特别是对于大气温度和湿度廓线探测,细化探测分层,十分有利于提高三维反演精确度。

在 1 GHz~1 THz 频段,大气中主要吸收的气体是水汽( $H_2O$ )和氧气( $O_2$ )。通过对氧气吸收谱线的测量,可以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,可以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,分别是 57.29 GHz,118.75 GHz 和 424.76 GHz,并有 183.31 GHz 和 380.20 GHz 两条较强的水汽吸收线。

目前在轨应用的美国第 3 代气象辐射计(Advanced Technology Microwave Sounder, ATMS)<sup>[6]</sup>见图 1,俄罗斯的 MTVZA 系列辐射计<sup>[7]</sup>见图 2,都已经设置了 183 GHz 通道。俄罗斯正在研究 0.13 THz~0.38 THz 的  $8 \times 8$  辐射计阵列<sup>[8]</sup>。此外,新一代的同步轨道辐射计已经开始设计 183 GHz,220 GHz,340 GHz,380 GHz,425 GHz 等通道,可用于进行地表降水和水汽含量的探测。

除气象活动观测之外,太赫兹波段探测载荷还可以实现大气成分的检测,例如,2004 年,美国发射了 Aura 对地观测卫星,其搭载的 2.5 THz 临边探测载荷可用于对地球大气中 OH 根离子、臭氧、氯氧化物等成分的浓度和分布进行探测成像<sup>[11]</sup>,目前已经获得了丰富的观测数据。

### 1.2 深空探测

从宇宙大爆炸至今,宇宙的背景温度已经降至约 2.73 K,依据热辐射理论,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。目前深空探测的五大重点领域包括: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<sup>[12]</sup>,具体观测内容包括月球能源、矿产的含量、类型和分布、月壤厚度、成分;此外,探测器会着陆于行

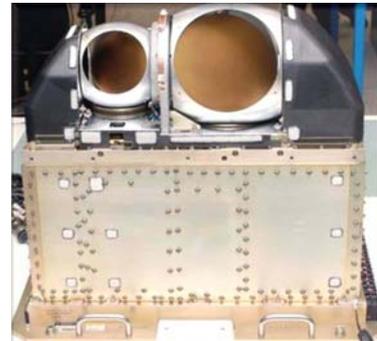


Fig.1 US Advanced Technology Microwave Sounder<sup>[9]</sup>  
图 1 美国 ATMS 辐射计,2 幅天线分别接收 23.8 GHz~60 GHz 频段和 89 GHz~183 GHz 频段<sup>[9]</sup>



Fig.2 Russian microwave imager/sounder MTVZA-GY for spacecraft "Meteor-M",with three frequency channels around 183 GHz<sup>[10]</sup>  
图 2 俄罗斯 "Meteor-M" 飞船搭载的 MTVZA-GY 辐射计在 183 GHz 附近具有 3 个细分的通道<sup>[10]</sup>

星及卫星、彗星等,进行物质现场分析等。现有的探测载荷包括各频段的频谱探测器,已经拓展到了太赫兹频段。美国好奇号火星车携带质谱仪、气相色谱仪、激光分光计及化学摄像机等可对激光气化的固态物质进行成分分析<sup>[13]</sup>,为了获得更加丰富的物质信息,未来可以开发太赫兹频段质谱仪,其功能与现有的太赫兹时域频谱系统(THz-TDS)类似,可以同时获得很宽频带内的信息,但是体积、质量、功耗的严苛限制将成为其实现的最大挑战。

目前已有多种太赫兹深空探测载荷在轨应用,例如,2004年,ESA(European Space Agency)的 Rosetta 深空探测卫星携带多种科学探测载荷中包括 1 台 562 GHz 的频谱探测器,它飞往彗星 Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko 并穿越其彗尾,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<sup>[14]</sup>。

2007年,ESA 的 Herschel 卫星前往地日拉格朗日 L2 点,该卫星实际为一台口径 3.5 m 的被动制冷望远镜(该项目早期名称即为“远红外与亚毫米波望远镜”),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(HIFI),见图 3,使用低噪声的超导—绝缘—超导(Superconductor Insulator Superconductor, SIS)探测器和热电子辐射量热计(Hot Electron Bolometer, HEB)混频器,对深空进行宽频段探测。与地面探测设备相比,由于没有大气干扰,可以获得更远的探测距离和更高的分辨率。

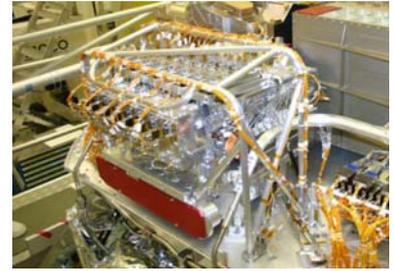


Fig.3 HIFI unit for Herschel satellite<sup>[14]</sup>  
图 3 Herschel 卫星搭载的 HIFI 载荷<sup>[14]</sup>

## 2 空间通信

太赫兹波在新一代无线通信领域具有非常好的应用前景。太赫兹频率位于红外线和高频无线电之间,它的载波频率比微波高约 2 个量级,信息容量更大,是很好的宽带信息载体,且太赫兹波波长更短,其发射方向性要优于微波;与光通信相比,它不会受到人眼安全功率限制,也不会遇到强度调制/直接检测(IM/DD)灵敏度不足和相干通信设备复杂的难题。工作在太赫兹频段的自由空间光学设备可以将无线电波和可见光的优点结合起来,在中短距离大容量无线通信中具有很好的应用潜力,是无线通信在 500 MHz~5 GHz 频段资源日趋稀缺后的热门频段。国际电信联盟已指定 0.12 THz 和 0.22 THz 的频段分别用于下一代地面无线通信和卫星间通信;并在 2012 年世界无线电通信大会(WRC-12)明确指出未来 275 GHz~3 000 GHz 之间频段资源可提供登记使用<sup>[15]</sup>。典型太赫兹通信验证试验及系统列入表 1。

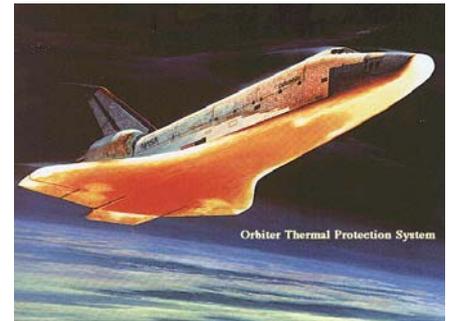


Fig.4 Drawing of space shuttle orbiter covered by plasma sheath during reentry conditions<sup>[22]</sup>  
图 4 航天飞机再入时被热等离子鞘套包覆情形示意图<sup>[22]</sup>

表 1 具有代表性的太赫兹通信系统  
Table1 Communication systems in terahertz band

research organization	time	parameters	characters
Technique University Braunschweig, Germany <sup>[16]</sup>	2004	25 kbit/s, broadband THz-TDS platform	electrical controlled 2-dimensional electron gas modulation realized by high speed photo-electrical devices(UTC-PD) and InP high mobility devices, respectively
NTT Corporation, Japan <sup>[17-18]</sup>	2004 2006	10 Gbit/s, 120 GHz, range >1 km	commercial available, self adapting in different channel environments
ELVA-1 Company, Russia <sup>[19]</sup>	—	1 Gbit/s, 96 GHz	table top experimental system, using highly integrated QCL and QWP
Shanghai Institute of Technical Physics, CAS <sup>[20]</sup>	2009	4.1 THz	16 QAM, real-time demodulation and software demodulation
China Academy of Engineering <sup>[21]</sup>	2012	10 Gbit/s, 0.14 THz, range 0.5 km	

### 2.1 太赫兹抗黑障干扰测控通信技术

航天器再入段的测控通信是航天任务的要害环节,再入航天器穿越稠密大气层经历的黑障现象严重威胁着航天任务的安全;空天飞行器为实现 2 小时达到地球上任何一点,需要持续以 10 倍左右音速穿行于临近空间,同样面临黑障阻断通信的难题。

飞行器再入稠密大气时,舱体与周围空气发生剧烈摩擦,形成温度高达数千摄氏度的高温等离子鞘套,如图 4 所示。等离子鞘套中等离子共振频带很宽,对现有无线电通信波段发生强烈吸收和反射,形成电磁屏蔽,使返回舱与外界的无线电通信衰减,甚至中断,导致飞行器与地面控制中心失去联系,同时雷达电波被等离子鞘套吸

收, 导致雷达无法发现返回舱的踪迹, 故这个测控通信的盲区被称为“黑障区”。

提升通信载波频率是解决黑障问题的有效措施。

等离子体鞘套的电磁特性随着飞行器的速度和飞行环境的变化而变化, 依据其中电子密度、等离子体角频率、碰撞频率等电特性参数, 可以确定等离子体对在其中传输的电磁波产生的作用。

等离子体电子密度  $n_e$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) 与空气密度和等离子体区温度有关, 飞行速度越高, 鞘套内电子密度越大<sup>[23-24]</sup>。

等离子体中电子受外力会偏离平衡位置, 在分离的正负电荷电场力牵引下产生复合振荡过程, 其振荡频率称为电子等离子体振荡频率, 为某一等离子体环境的固有参数, 与等离子体电子密度关系如下:

$$\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e} \quad (1)$$

式中:  $e$  和  $m_e$  分别是单电子的电量和质量;  $\epsilon_0$  是真空中介电常数。

碰撞频率  $\nu$  用来度量电子在等离子体内与中性粒子的碰撞速率, 反映等离子体对电磁波信号的损耗程度。该参数与空气密度和温度有关, 表示为:

$$\nu = c(\rho/\rho_0)T \quad (2)$$

式中:  $c$  为真空中光速;  $\rho_0$  为海平面标准大气压下的空气密度;  $\rho$  为飞行高度处的空气密度;  $T$  为温度。

由电磁场基本理论可得某环境中电磁波的波数表达为:

$$k = \beta + i\alpha = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为吸收系数;  $\beta$  为相位系数;  $\omega$  为载波角频率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\epsilon_r$  为等离子体介电系数。

吸收系数与各参数之间存在重要关系:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{2}} \sqrt{-1 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu^2}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2}} \quad (4)$$

分析可知, 当无线电频率小于或等于等离子体频率时, 等离子体呈导体特性, 电磁波在其中传输时严重衰减, 并在等离子体——周围空气界面形成强反射; 反之, 当  $\omega$  远远大于  $\omega_p$  时, 电磁波在等离子体中传播时相当于在自由空间中传输, 吸收和反射非常小, 如果使用这个波段的电磁波作为通信载波, 就可以顺利穿透等离子体, 不会造成通信黑障。

美国较早关注了黑障区通信问题, 并系统研究了载波频率选择对消除黑障作用的影响。早在 20 世纪 60 年代, 美国便开展了“无线电衰减测量”(Radio Attenuation Measurements, RAM)实验, 结果表明随着载波频率的提升, 黑障区高度及时间均被明显压缩, 与理论吻合很好。但是限于当时技术条件, 测试频率的高端仅达到 X 波段, 且并不能完全消除黑障现象。目前正在开展 Ka 频段的测控通信研究, 但仍不能有效穿透极端条件下的等离子鞘套<sup>[25]</sup>。

进一步将载波提升到太赫兹频段, 可望突破黑障现象。假设均匀等离子体鞘套的简单情形, 假设电子密度  $n_e = 2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , 碰撞频率  $10 \text{ Grad/s}$ <sup>[26]</sup>, 等离子体鞘套厚度分别为 1 cm, 6 cm, 10 cm 3 种情况, 仿真得到功率透射谱如图 5 所示, 可以清晰看到, 在极高频(EHF)以上, 进入太赫兹频段, 衰减小于 3 dB, 所以提升通信频率至太赫兹波段有望实现突破黑障的低衰减率通信。现阶段直接使用太赫兹频段进行通信

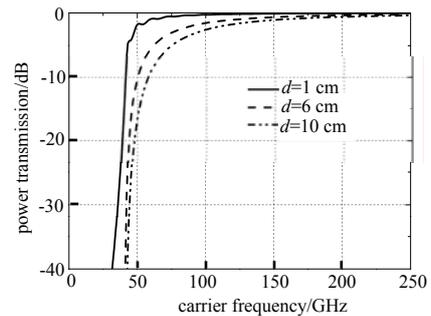


Fig.5 Power transmittance for electromagnetic carrier through plasma sheath with different thicknesses  
图 5 不同厚度均匀等离子体鞘套模型的功率透射谱

存在一些困难, 主要是太赫兹波段在近地富含水汽的稠密大气中损耗过大, 可达 100 dB/km 量级, 加之高功率太赫兹辐射源技术不成熟, 例如工作于太赫兹波段的连续波真空电子器件功率仅达到瓦特量级, 基于半导体工艺的片上器件平均功率仅为百毫瓦左右, 难以支持地面站至再入航天器和空天飞行器的通视链路, 需要考虑使用空天平台在对流层以上的空间中进行中继。空天平台包括跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)、临近空间气球/飞艇等。对于需要在本土回收的航天器, 可以在着陆场部署多个临近空间气球/飞艇构成中继测控网, 搭载太赫兹波段的通信测控终端, 与再入航天器进行无间断的通信, 并与地面站使用传统无线电波段进行信息的传输, 以实现再入航天器的全程测控, 如图 6 所示, 中继测控网络构形、自适应覆盖都是需要开展研究的课题; 对在全球范围执行任务的空天飞行器, 可以使用多平台接力中继方式或平台——中继卫星复合测控方式, 保证其在飞行的任意弧段可以完成无间断的通信业务。

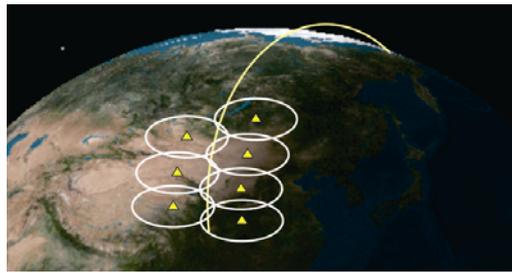


Fig.6 Drawing of TT&C network based on near space platforms. The curve is reentry trace, circles are coverage area of every node(triangle in the circle)

图 6 临近空间平台基测控通信网示意图, 曲线为再入轨迹, 圆心三角为中继节点, 圆圈为每个节点覆盖范围

## 2.2 基于太赫兹链路的动态卫星通信网络

星间链路是通信卫星技术发展的一个新领域,也是支撑未来卫星通信业务扩大和发展的基础。星间链路可以节约不可再生的地球静止轨道(GEO)资源和频谱资源,减少传输延时(克服双跳),增加覆盖和连接能力,减少地面站天线数量,是克服卫星通信中日凌中断的唯一方法。

太赫兹波频率高,绝对带宽大,通信容量大,波束窄,必将成为星间链路技术的重要发展方向。

太赫兹波段星间链路还具有优异的安全性。太赫兹波波束宽度较小,方向性较好,抗截收能力和抗干扰(特别是对核电磁脉冲干扰)能力强;在太赫兹波频段,大气衰减特别显著,可以避免来自地面的信号干扰,同时也防止星间链路信号泄漏到大气层以内干扰其通信系统,具有天然的保密特性,这对应用中防止敌方的侦收具有实际意义。

编队飞行技术是 21 世纪空间系统的核心技术。编队飞行小卫星群具有更好的灵活性和冗余度,可降低任务失败的风险,实现单颗大卫星所不能实现的功能<sup>[27]</sup>,可用于地球同步轨道上编队飞行的区域导航、对地全球遥感、三维立体观测、电子侦察、深空探测等方面。目前编队飞行正在快速发展,典型系统包括美国 A-Train 卫星编队系统、德国 TanDEM-X 双星系统、瑞典 Prisma 双星系统,以及我国最新的神舟七号飞船与其伴飞微小卫星系统等。

另一种空间集群系统称为“分布式载荷”。2007 年,美国先进研究项目局(DARPA)启动了 F6 项目,见图 7,旨在构建“通过信息交换链接的未来、快速、灵活、分离模块化、自由飞行的航天器”(Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free-Flying Spacecraft united by information exchange)系统<sup>[29]</sup>。

编队飞行网络和分布式载荷的特点包括:节点间距较近(典型为几米~几十千米);基线动态变化;分布工作模式决定存在海量数据需要交换或交由中心处理;节点多为微小卫星系统,甚至纳星系统,平台小,对载荷体积质量功耗要求较高。

使用太赫兹频段短距星间链路可以有效适应此类系统的需求,表现在:现有器件水平可以满足短距离通信的需求;太赫兹频段普遍使用单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)及小天线技术,可以实现小型轻量低功耗的通信载荷;太赫兹高速通信满足大数据交换量的要求。

需要突破的技术包括:太赫兹小型化通信载荷集成技术、信号高动态范围自适应技术、简易的动态跟瞄技术(相比于激光通信)、太赫兹频段智能天线技术、动态网络构架规划及动态核心网络等。目前针对这些关键技术已经开展了广泛的研究<sup>[30]</sup>。

## 3 空间防御

太赫兹频段的雷达载荷有望在空间防御中收到独特的效益,使用太赫兹波作为雷达载波与传统微波雷达相比:太赫兹雷达波长更短,信号绝对带宽大,纵向分辨率高<sup>[31]</sup>,且对相同目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)大;相同的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率;短的雷达波对目标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;窄的天线波束可以减少干扰信号注入雷达主瓣波束的几率,同时高增益有效抑制旁瓣,抗干扰性好。



Fig.7 Schematic of F6 project<sup>[28]</sup>

图 7 美国 F6 项目示意图<sup>[28]</sup>

使用太赫兹波作为雷达载波与激光雷达相比：视场范围宽，搜索能力强；对于相同尺寸的天线，太赫兹雷达波束宽度比激光雷达宽得多，故探测视场要大得多，对于同样的视场范围，能够更快地完成扫描，故搜索能力更强；太赫兹波穿透能力强，由于波长长于光波，可以穿透对光波段形成障碍的雾、尘等环境，实现应用领域更广的探测和成像。美国、俄罗斯、欧洲和我国都已开始研究自己的太赫兹雷达系统，总结如表 2 所示。

表 2 具有代表性的太赫兹雷达系统  
Table 2 Typical radar systems in terahertz band

research organization	time	parameters	characters
Jet Propulsion Laboratory, USA <sup>[32-34]</sup>	2008-2010	120 GHz-670 GHz, resolution better than 1 cm	all solid-state devices, scanning imaging
FGAN-FHR/MHS, Germany <sup>[35]</sup>	2007	220 GHz, bandwidth > 8 GHz, resolution < 2 cm	ISAR mode, FM-CW, all solid state MMIC devices, fast imaging
ELVA-1 Company, Russia <sup>[19]</sup>	—	94 GHz, operation range 500 m, range resolution 5 mm	commercial system available
China Academy of Engineering <sup>[36-37]</sup>	2012	140 GHz, bandwidth > 5 GHz, resolution 3 cm	ISAR mode, microwave multiplier chain using as power source
	2013	670 GHz, bandwidth 28.8 GHz, resolution 1.3 cm	

### 3.1 航天器载来袭威胁告警雷达

随着航天活动的持续增加，空间碎片数量激增，已发生多起航天器被空间碎片毁伤的案例。大型空间碎片，尺寸在 10 cm 以上，可对航天器造成毁灭性撞击，这类碎片已可实现地面监控和编目；中型空间碎片，典型尺寸为 1 mm~10 cm，典型质量 1 mg~1 kg，无法进行地基探测，且航天器本身的加固防御不足以抗御。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无论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告警技术是实现卫星主动规避风险的有效手段。

此外，卫星本身也是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，它们使用自身高速飞行带来的动能撞击杀伤目标，效益比爆炸性攻击武器还高，例如 TNT 炸药含能为 4.6 MJ/kg，而以 10 km/s 速度飞行的 KKV 含能可高达 50 MJ/kg，因此 KKV 不需要装载爆炸物，体积显著减小，机动性极大提升，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主动防御需求。

使用高频段的星载太赫兹雷达进行探测和告警可以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，但是在没有大气吸收的空间环境中，太赫兹雷达可以充分发挥其优势。空间碎片和 KKV 的运动速度都极快，设计以侦测空间中碎片和预告来袭威胁目标为目的的太赫兹雷达系统，需要考虑实现较远探测距离以给解算和规避留出充足时间余量。

使用传统微波雷达，由于波长较长，当目标直径  $d$  与载波的尺度满足  $\pi d/\lambda < 0.6$  时，目标呈现瑞利散射，其有效散射面积(Radar Cross-Section, RCS)表达为<sup>[38]</sup>：

$$\sigma_R \approx 2.25\pi d^2 (\pi d/\lambda)^2 \quad (5)$$

而当使用太赫兹波段载波时，显然不满足瑞利条件，目标对太赫兹雷达呈现光学特性，故可以有效增大雷达目标的 RCS，其 RCS 表达为：

$$\sigma_o = \pi d^2/4 \quad (6)$$

故相同的目标在太赫兹波段具有更大的 RCS，使用相同功率的太赫兹雷达有助于提高对目标的探测距离。

结合太赫兹器件的发展趋势，合理化选择器件参数<sup>[39-43]</sup>，假设使用 300 GHz 载波的宽带脉冲雷达，发射脉冲峰值功率 5 MW，带宽 1 GHz，发射—接收天线直径为 300 mm，探测灵敏度为 -84 dBm (300 K)，则可得到对不同尺度目标的最大探测距离，如图 8 所示。

可以看出，对于较小目标，如尺度 10 cm 以下的空间碎片，太赫兹雷达探测距离可以达到数十千米，这为及早发现潜在威胁，进行评估并采取措施提供了便利；对于较大目标，如尺度 30 cm 量级的 KKV<sup>[44]</sup>，探测距离接近 100 km，以相对速度 10 km/s 计，太赫兹预警雷达可以给航天器提供约 10 s 的反应时间，结合高速运算和规避能力，可以极大提升航天器的对抗与生存能力。

但是大尺度天线在提供高增益的同时会导致束散角过小，这样扫描所需区域时间就会大大增加，不同尺度天

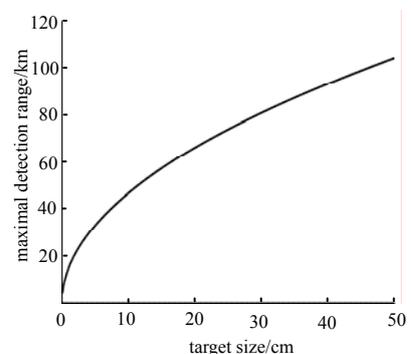


Fig. 8 Detecting range for target with different scales  
图 8 不同尺度目标的探测距离

线发射的 300 GHz 载波理想束散角如图 9 所示。

选择较小口径的天线可以适当增大发射波束的束散角,增大波束的覆盖范围。例如选用 300 GHz 载波探测截面尺度 30 cm 的来袭 KKV,最大探测距离约 80 km,在最大探测距离上波束截面尺度约为 350 m,小角度转动天线,便可以快速完成较大范围的扫描。

### 3.2 天基弹道目标中段预警

随着战争的需要,人类战场已经由领土、领海和领空延伸到了太空。来自太空的战争威胁日益严峻,特别值得关注的是远程弹道导弹,它们射程远,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,是战略大国之间制衡的重要武器,也是弱小国家保护自己的终极手段。为了防备导弹攻击,各国都在完善自己的防御体系,防御体系中非常重要的部分为实现探测、跟踪的预警系统,如图 10 所示。使用卫星搭载敏感器进行导弹目标的探测,可极大拓展探测范围,延长预警时间。

弹道导弹的飞行过程分为主动段、中间段和再入段,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导弹目标,同时使用天基光学敏感器探测主动段高层的火箭尾焰<sup>[45-46]</sup>。但是当导弹进入飞行中间段,火箭停止工作,弹箭分离,弹头红外特征明显降低,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进行飞行,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,是提升反导能力的关键。

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,且雷达波受地球大气衰减作用,对空间目标的探测距离受限;使用星载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率,可以降低漏警率。中间段预警面临的另一挑战来自诱饵的干扰,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。重诱饵是最为危险的威胁,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、质量分布具有很大差异,这就造成了其运动状态的差异,例如弹箭分离后的翻滚状态及自旋,由于真假弹头的质心分布不同,其旋转、翻滚、进动的运动参数将呈现差异。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,包括改变鼻锥指向等,这都是假弹头不具备的,这些也成为使用雷达区分真假目标的判据。

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,低分辨雷达不能用于提取其结构特征。太赫兹波段的宽带雷达对目标回波中微小的多普勒变化更为敏感<sup>[47-49]</sup>,对微动目标的测量可以反演出其独特的运动和结构特性,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,太赫兹频段合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)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,这样可以直接解读出目标的姿态状态,通过判读,可以通过其特殊的姿态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 结论

太赫兹波段是电磁频谱中连接红外光波段与毫米波波段的桥梁,也是宏观电子学向微观光子学过渡的纽带,在空间应用中具有特别重要的地位。太赫兹敏感仪器已在深空科学观测、对地大气观测和气象观测中发挥了重要

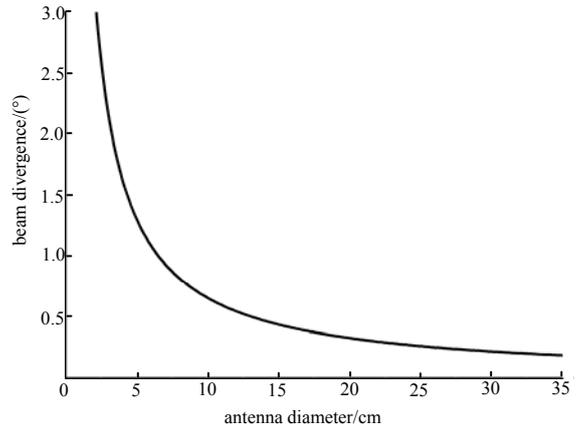


Fig.9 Beam divergence to antenna diameter  
图 9 不同天线口径对应的束散角

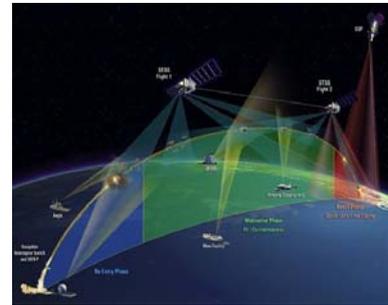


Fig.10 Schematic of missile defense system based on space tracking and surveillance  
图 10 基于天基预警系统的弹道导弹防御体系示意图

作用,这也是太赫兹在空间技术中最早且最广泛的应用。随着技术的进步,与地面新一代无线通信技术同步,太赫兹通信技术在空间通信领域受到重视,有望在实现无黑障中断的测控通信以及构建空间网络方面发挥巨大作用。太赫兹雷达系统以其小型轻量、高分辨率等优势应用于航天器自身威胁告警和弹道目标监测,将成为空间攻防体系建设的重要研究目标。随着对太赫兹技术研究的深入,其在空间领域的应用也必将得到极大拓展。

#### 参考文献:

- [1] Kirby P L, Pukala D, Manohara H, et al. Characterization of micromachined silicon rectangular waveguide at 400 GHz[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(6):366–368.
- [2] 崔博华, 王成, 郑英彬. 太赫兹 MEMS 滤波器性能影响因素[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(2):319–322. (CUI Bohua, WANG Cheng, ZHENG Yingbin. Influencing factor on performance of terahertz MEMS filter[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(2):319–322.)
- [3] Fitch M, Osiander R. Terahertz waves for communications and sensing[J]. *John Hopkins APL Technical Digest*, 2004, 25(4):348–355.
- [4] 卢昌胜, 吴振森, 李海英, 等. 基于 HITRAN 的太赫兹波大气吸收特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(3):346–349. (LU Changsheng, WU Zhensen, LI Haiying, et al. Atmospheric absorption characteristics of Terahertz-wave based on HITRAN[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(3):346–349.)
- [5] 张蓉蓉, 李跃华, 王剑桥, 等. 相对湿度对 0.4 THz 电磁波大气传输衰减的影响[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(1):66–69. (ZHANG Rongrong, LI Yuehua, WANG Jianqiao, et al. Effect of relative humidity on atmospheric propagation attenuation of 0.4 THz electromagnetic wave[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(1):66–69.)
- [6] Liu X, Kizer S, Barnett C, et al. Retrieving atmospheric temperature and moisture profiles from NPP CRIS ATMS sensors using CrMSS EDR algorithm[C]// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Munich:[s.n.], 2012.
- [7] Grankov A G, Mil'shin A A, Shelobanova N K, et al. Comparison of data measured in the North Atlantic region by the MTVZA radiometer of a meteor-3M satellite and by the SSM/I radiometer of the F-13(DMSP series) satellite[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, 51(2):158–163.
- [8] Zabolotny V F, Yakopov G V, Mingaliev M G, 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.
- [9] Edward K, Cheng-H Joseph L, Vince L R, et al. The Advanced Technology Microwave Sounder(ATMS): A New Operational Sensor Series[C]// *Goddard Space Flight Center*. Munich:[s.n.], 2012.
- [10] Gorobets N N, Chernyavsky G M, Cherny I V. Advanced antenna of microwave imager/sounder for spacecraft “METERO-M” [C]// *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona:[s.n.], 2010.
- [11] Mueller E R, Henschke R, Robotham, et al. Terahertz local oscillator for the Microwave Limb Sounder on the Aura satellite [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22):4907–4915.
- [12] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 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 strategy[J]. *Aerospace China*, 2002(12):28–32.)
- [13] Mahaffy P, Webster C R, Conrad P G. The sample analysis at Mars investigation and instrument suite[R]. *Goddard Space Flight Center, Jet Propulsion Laboratory*. GSFC.JA.5567.2011, GSFC.JA.6685, SPRINGER:[s.n.], 2012.
- [14] Gulkis S, Frerking M, Crovisier J, et al. MIRO: Microwave Instrument for Rosetta Orbiter[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1–4):561–597.
- [15] Consideration of the frequencies between 275 and 3 000 GHz, Resolution 950(WRC-07)[EB/OL]. [2013-08-01]. <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=conferences&link=wrc-12&documents=1&lang=en>.
- [16] Kleine-Ostmann T, Pierz K, Hein G, et al. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(2):124–126.
- [17] Nagatsuma T, Hirata A, Sato Y, et al. Sub-terahertz wireless communications technologies[C]// *18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications and Joint COST 284 Workshop*, (IEEE Cat. No. 05EX1125C). Dubrovnik:[s.n.], 2005.
- [18] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, et al. 120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J]. *IEEE*

- Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006,54(5):1937-1944.
- [19] ELVA-1 Millimeter Wave Division Product Catalog[EB/OL]. [2013-08-01]. www.elva-1.com.
- [20] 谭智勇,陈镇,韩英军,等. 基于太赫兹量子级联激光器的无线信号传输的实现[J]. 物理学报, 2012,61(9):098701. (TAN Zhiyong,CHEN Zhen,HAN Yingjun,et al. Experimental realization of wireless transmission based on terahertz quantum-cascade laser[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(9):098701.)
- [21] 邓贤进,王成,林长星,等. 0.14 THz 超高速无线通信系统实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(6):1430-1432. (DENG Xianjin,WANG Cheng,LIN Changxing,et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(6):1430-1432.)
- [22] Stewart G E,Hartunian R A,Seibold R W,et al. Causes and mitigation of radio frequency(RF) blackout during reentry of reusable launch vehicles[C]// Aerospace Corporation Report, No.ATR-2006(5309)-1, 2007. FAA/ AST Commercial Space Transportation Advisory Committee(COMSTAC) RLV Working Group Meeting. Washington:[s.n.], 2007.
- [23] 李江挺,郭立新,方全杰,等. 高超声速飞行器等离子鞘套中的电磁波传播[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(5):969-973. (LI Jiangting,GUO Lixin,FANG Quanjie,et al. Electromagnetic wave propagation in plasma sheath of hypersonic vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(5):969-973.)
- [24] 韦震,龙方,韩中生,等. 用于飞船返回舱再入段测量的太赫兹雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):199-202. (WEI Zhen,LONG Fang,HAN Zhongsheng,et al. Terahertz radar for the measurement of the spacecraft reentry capsule[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):199-202.)
- [25] 胡红军,陈勇,陈菊. 飞行器黑障区测控技术问题探讨[J]. 火箭与制导学报, 2012,32(2):197-199. (HU Hongjun, CHEN Yong,CHEN Ju. The discussion on TT&C technology for spacecraft in blackout area[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012,32(2):197-199.)
- [26] 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.
- [27] 陈志明,王惠南,刘海颖. 与信息一致性的分布式卫星姿态同步研究[J]. 宇航学报, 2010,31(10):2283-2288. (CHEN Zhiming,WANG Huinan,LIU Haiying. Research on distributed satellite attitude synchronization based on information consensus [J]. Journal of Astronautics, 2010,31(10):2283-2288.)
- [28] 刘豪,梁巍. 美国国防高级研究计划局 F6 项目发展研究[J]. 航天器工程, 2010,19(2):92-98. (LIU Hao,LIANG Wei. Development of DARPA's F6 Program[J]. Spacecraft Engineering, 2010,19(2):92-98.)
- [29] System F6[EB/OL]. [2013-08-21]. <http://www.darpa.mil/TTO/programs/systemf6/>.
- [30] 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.)
- [31] 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.], IEEE, E-ISBN:978-1-4244-2120-6, 2008.
- [32] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N,et al. Penetrating 3-D imaging at 4 and 25 meter range using a submillimeter-wave radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008,56(12):2771-2778.
- [33] 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.
- [34] Cooper K,Dengler R,Llombart N,et al. Fast, high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters[C]// Terahertz Physics, Devices,and Systems IV:Advanced Applications in Industry and Defense. Orlando, Florida:[s.n.], 2010.
- [35] Essen H,Wahlen A,Sommer R,et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. Electronics Letters, 2007,43(20):1114-1116.
- [36] 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 imaging technology for high resolution terahertz radar system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7-9.)
- [37] 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.)
- [38] Morchin W. Radar engineer's sourcebook[M]. Boston,London:ArtechHouse Inc., 1993.

- [39] Steer B, Roitman A, Horoyski P, et al. High power millimeter-wave Extended Interaction Klystrons for ground, airborne and space radars[C]// Radar Conference, 2009 IEEE, 978-1-4244-2871-7/09. Pasadena, CA: [s.n.], 2009.
- [40] 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. University of Michigan: [s.n.], 1994:73-83.
- [41] Brundermann E, Hubers H W, Kimmitt M F. Terahertz techniques[M]. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co., 2012.
- [42] 王瀚卿, 黄理勇, 苏兴华, 等. 星载高灵敏度太赫兹遥感接收技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):340-345. (WANG Hanqing, HUANG Liyong, SU Xinghua, et al. Terahertz remote sensing on satellite[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):340-345.)
- [43] 李晋, 皮亦鸣, 杨晓波. 基于回旋管的星载太赫兹成像雷达设计与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10):892-898. (LI Jin, PI Yiming, YANG Xiaobo. Spaceborne imaging radar system based on gyrotron in terahertz band design and simulation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(10):892-898.)
- [44] Webber T, Flint K. Ground testing kinetic energy projectiles for the Lightweight Exo-Atmospheric Projectile (LEAP) Program[C]// 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, No. ADA345802. Phillips Lab, Edwards AFB, Ca: [s.n.], 1992.
- [45] SUN Huixia, LIU Zheng. Micro-Doppler Feature Extraction for Ballistic Missile Warhead[C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation. Changsha: [s.n.], 2008:1333-1336.
- [46] 李盾, 周一宇, 吕彤光, 等. 空间预警系统对弹道导弹发射点战术参数估计方法[J]. 宇航学报, 2001, 22(6):84-90. (LI Dun, ZHOU Yiyu, LV Tongguang, et al. Tactical parameter estimation of ballistic missile launch with space early warning system[J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(6):84-90.)
- [47] SUN Huixia, LIU Zheng. Micro-Doppler Feature Extraction for Ballistic Missile Warhead[C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, Changsha: [s.n.], 2008:1333-1336.
- [48] 朱得糠, 刘永祥, 李康乐, 等. 基于雷达相位测距的微动特征获取[J]. 宇航学报, 2013, 34(4):574-582. (ZHU Dekang, LIU Yongxiang, LI Kangle, et al. Feature extraction for target with micro-motion based on radar phase derived range[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(4):574-582.)
- [49] Xie L G, Wen S L, Kuang Y. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4):1969-1982.

#### 作者简介:



刘丰(1984-), 男, 西安市人, 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、空间网络技术等. email: liuhvst@126.com.

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

钟凯(1984-), 男, 济南市人, 博士, 主要研究方向为全固态激光技术及太赫兹技术.

姚建铨(1939-), 男, 上海市人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体激光技术、非线性频率变换技术、太赫兹技术.

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

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、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、阵列信号处理等.