

高技术前沿

今年上半年,一则来自航天领域的消息,又一次把太赫兹技术从实验室推向了大众视野。

6月11日,通信技术试验卫星二十五号发射升空,顺利进入预定轨道。据悉,该卫星主要用于开展多频段、高速率卫星通信技术验证。面对海量数据传输需求,拓展可用频段、提升传输速率,成为未来空间通信发展的重要方向,也为太赫兹技术提供了广阔应用空间。

相较于传统通信方式,太赫兹通信具有大带宽潜力。以往卫星拍摄的超高分辨率对地观测影像,要花数十分钟分批上传;然而未来借助太赫兹链路,相同大小的数据包仅需短短数秒就能传

回。随着相关技术不断发展,太赫兹通信未来有望为“6G空天地海一体化网络”搭建起一条无形的“太空光纤”。

近年来,凭借与生俱来的频谱禀赋和超大带宽、高分辨率成像、安全穿透等特点,太赫兹技术正持续赋能为多个行业。作为电磁波谱里的特殊频段,如今太赫兹波正渐渐成为支撑6G、智能感知、生命科学与高端制造等技术发展的未来引擎。

那么,太赫兹技术藏着怎样的科学密码?其未来发展将给人类社会带来哪些影响?本期,让我们一同走进电磁波的广袤谱系,揭开太赫兹的神秘面纱。

热点追踪

“超强厄尔尼诺事件正在形成”“或自1951年以来最强气候事件”……最近,关于“超强厄尔尼诺”的相关资讯频繁登上热搜。

网络上,关于厄尔尼诺的讨论也非常热烈:“厄尔尼诺是什么?”“超强厄尔尼诺对我们有什么影响?”

人们对厄尔尼诺的认知,离不开各种极端天气与地质灾害的出现;高温热浪炙烤大地,暴雨洪涝冲毁家园,阶段性干旱令河床龟裂,泥石流裹挟泥沙毁坏道路……

从本质上,厄尔尼诺是赤道太平洋海气相互作用产生气候振荡的海洋表征,表现为赤道中东太平洋大片海域的海水表面温度持续异常变暖。

正常情况下,赤道太平洋的海水温度是“西热东冷”,西太平洋海水温暖,东太平洋海水偏冷。信风从东吹向西,把表层暖水“吹”到西边,东边的深层冷水就会上涌补充。但当厄尔尼诺发生时,信风会减弱甚至反向,东太平洋的暖水不再被“吹走”,海水温度就这样持续升高。而当海水温度一直升高达到高等级时,就形成了“超强厄尔尼诺”。

9月3日,世界气象组织发布公报说,厄尔尼诺事件已确认出现,预计将在数月内增强为超强厄尔尼诺事件,对全球降雨和温度变化产生重大影响,导致出现极端天气的风险增加。世界气象组织呼吁各国密切监测事件发展,并及时采取应对措施。

「超强厄尔尼诺」意味着什么

■顾春利

那么,“超强厄尔尼诺”的出现,究竟意味着什么?

世界气象组织指出,本次超强厄尔尼诺事件将显著改变全球多个地区的降雨、温度和大气环流模式,增加洪涝、干旱和极端高温的风险。但事件强度本身并不直接决定某一特定地区的受灾程度,实际产生的影响受地理位置、季节、气候因素等的共同作用。

——“超强厄尔尼诺”或将带来高温热浪等极端天气。

今年,厄尔尼诺给世界不同地方带来了高温热浪。在斯里兰卡,许多城市遭遇了数十年来最严重的干旱,主要农业区降雨量锐减85%,数百座水库水位下降九成,民众面临饮用水短缺;在泰国,干旱重创农作物种植,全国稻谷预计将减产540万吨,给农业生产领域带来损失。

——“超强厄尔尼诺”或将对全球海洋系统施压。

一方面,“超强厄尔尼诺”加剧海底“珊瑚白化”现象,原本色彩斑斓的珊瑚礁,将会变成“一片白花花”的惨白”。科学家警告,如今,澳大利亚大堡礁正出现大规模白化的风险。从全球范围来看,面临最严重白化风险的珊瑚礁比例,已从最早的不足7%增长到超过56%;另一方面,海洋是重要的“碳汇”,它能吸收二氧化碳,厄尔尼诺现象会减弱海洋吸收二氧化碳的能力,不利于温室气体清除。

有专家表示,由于海洋对大气的影响具有滞后性,超强厄尔尼诺事件带来的真正考验,可能出现在2027年春夏。不过,我们要清醒地认识到,虽然“超强厄尔尼诺”意味着极端灾害发生概率的增加,但并不意味着灾害的必然出现。只要我们保持高度警惕,持续跟踪监测气象变化,推动农业、水利、地质、应急等领域完善应急预案,就能提升对灾害天气的预警能力,最大程度上减少洪涝、极端高温等灾情造成的损失。

太赫兹：填平“鸿沟”成坦途

■付华璐 冯震升



通信技术试验卫星二十五号发射升空,面向多频段、高速率卫星通信开展技术验证。

新华社发

电磁波谱的“黄金间隙”

人类用肉眼看不到电磁波,但电磁波遍布我们周围:微波炉依靠微波搅动分子,加热食物;医院用CT设备给患者进行医学扫描时,主要依靠X射线穿透人体……这些都是电磁波在人类社会中的应用,唯一的区别,是电磁波振动频率的高低不同。

太赫兹波的频段落在0.1~10THz这个区间,波长介于0.03~3毫米之间。1THz代表每秒振荡1万亿次。相较于大家熟悉的5G通信,太赫兹波的频率高出数十乃至上百倍。频率越高,带宽越大。通信世界里,太赫兹波的带宽如同一条高速公路,带宽越大,可并行数据车辆的通道就越宽阔,信息洪流也得以毫无阻塞地奔腾。

在电磁波宏大的谱系版图上,太赫兹静卧于微波与红外之间,是一段奇妙的夹缝地带,一头连着电子学,一头连着光子学,兼得两边之长。论穿透性,它胜过红外与可见光;论成像精度,它远强于微波和毫米波;论安全性,它的光子能量远低于X光,不会对人体产生电离伤害,也不必过于担忧辐射风险。强穿透、大带宽、低损伤,多重优势集于一身,这便是独属于太赫兹的“异禀天赋”。

“太赫兹”这一名词诞生于1974年,当时,科学家弗莱明在光谱实验中捕捉到这一段特殊信号并将其命名。不过,此后的数十年间,这片黄金波段长期被锁在“技术牢笼”之中,有人称之为“太赫兹鸿沟”,也有人喻之为“悬浮在电磁波谱系里的孤岛”。

困境的根源,正是因为它夹在电子学与光子学之间的特殊位置。电子器件工作于如此高的振荡频率时转换效率微乎其微;光学器件又难以适配它的波长。缺少足够强劲的发射源和足够灵敏的探测器,使得人类看得见这片频谱所处的方位,却找不到登岸的舟楫。直到21世纪,随着半导体、新材料技术等不断发展,厚重的“鸿沟”才开始慢慢消融。太赫兹被美国列入“改变未来世界的十大技术”,被日本列入“国家支柱技术十大重点战略目标”,世界各国投入资金持续攻关;我国依托国家重大科研项目,持续对太赫兹技术布局多年,一步一步追赶突围,不断产出原创成果。

多域场景的“技术利刃”

当“太赫兹鸿沟”被一点点填平,那

些藏在夹缝中的频谱天赋,便化作一把把划破行业瓶颈的技术利刃,在通信、工业检测、公共安全、生命健康多个领域展现出广泛的应用前景。

——超大带宽:天地之间的信息通道。

太赫兹最耀眼的禀赋,是无可比拟的带宽能力。它能提供数十GHz的连续带宽,打个比方,与5G技术相比,相当于把双向四车道,拓宽成几百至几千个车道并行的超级通衢,从源头上化解移动通信的流量拥堵难题。

目前,面对全息通信、XR沉浸式交互等场景的技术要求,5G的带宽承载力渐渐显得捉襟见肘。而太赫兹技术,正是6G实现“空天地海一体化网络”的核心基石——海量探测数据,依托太赫兹星地链路,可实现秒级回传。放眼未来,它可以串联起散布在轨道上的无数卫星,搭建高速传输网络,构建起天地一体的信息骨架。试想一下,一部几十GB大小的4K高清影片,5G传输需要数

分钟,而太赫兹只需要短短数秒。全息直播、远程沉浸式交互……这些曾经停留在科幻作品里的场景,都有了落地的可能。

——超高分辨率:微观世界的无形探针。

太赫兹波长较短,波束纤细,穿透性强,自带超高分辨率,仿佛一枚可以深入材料内部的精密显微探针,能捕捉微米级甚至纳米级尺度的细微变化。

在高端制造领域,面对航空构件涂层、复合材料内部的微裂纹、孔隙缺陷,人类凭借肉眼与普通光学检测很难察觉。而太赫兹无损探测技术可以穿透材料表层,定位埋藏在材料内部的微小瑕疵,无需打孔,不损伤材料,即可守护航空、芯片产业的安全底线。

在智能探测感知赛道,太赫兹传感器延续了这一“穿透”优势。雨雾、沙尘会遮蔽可见光,让激光雷达“失明”。相比之下,太赫兹感知系统既能穿透恶劣

气象,又保有精细的分辨能力,能识别行人、非机动车、道路障碍物等,为驾驶车辆安上一双不惧迷雾的“慧眼”。

——安全透视眼:民生场景的温柔守望。

太赫兹还有一项珍贵特质,那就是在具有穿透能力的同时,还具有生物安全性。太赫兹光子能量微弱,安全性高,同时能够穿透塑料、织物等非金属材料,实现无接触透视,未来应用于城市公共空间等场景时更具优势。

传统安检依靠金属探测门、手持探测器等方式,只能识别金属物品,极易漏检陶瓷刀具、粉末、胶体危险品等;X光安检方式则存在辐射顾虑。而太赫兹安检设备,可以实现行人无感通行,行人不用脱包、不用停下等待,就能一次性识别各类违禁品,兼顾安全与效率,目前已经在口岸、大型场馆逐步落地。

除了安防领域,太赫兹还正叩响医学界的大门。依托太赫兹光声探测技

“有人无人混编”渐成战场新常态

■朱启超 李秋颖

AI+军事

无人战车在前方开路,机器狗在地面穿行,部队依托无人平台提供的侦察信息和火力支援向纵深推进……

今年4月至5月举行的“非洲雄狮-2026”联合演习中,美军借助无人平台,加快“从传感器发现目标到作战力量实施行动”的进程,大大压缩了指挥员指挥决策时间。演习中,美军地面无人车辆、遥控系统与有人机力量同步行动,无人平台用于实施通道突破、前沿探测和风险隔离。

当演训中越来越多的无人平台协同地面部队实施突破,一个共识逐渐清晰:未来战场上对无人装备的运用已不满足于验证单个平台性能,还检验无人装备与传统作战力量共同编组、共同感知和共同行动的实战能力,可以这样说,“有人无人混编”渐成战场新常态。

面向未来战场,“有人无人混编”正在使侦察、指挥和打击链路之间的联系更加紧密,推动传统线性作战链路向更高效的人机协同作战链路转变。

——拓展战场感知边界。

以空降部队在陌生地域作战为例,空降部队进入陌生地域后,往往面临敌情不明、地形不熟、通信受限等问题。仅仅依靠官兵抵近观察,不仅侦察范围有限,还可能过早暴露行动企图。

此时,无人平台前出部署,可以帮助部队把分散布置的传感器延伸到步兵视线之外,为指挥员提供更加实时、连续的战场信息;空中小型无人机可以越过山地、林地和建筑物遮蔽,搜索敌方人员、火力点和障碍设施位置;地面无人平台则可进入街巷、建筑物入口和地下空间,弥补空中观察受遮挡、难以长时间驻留等不足。

——压缩作战链路时间。

今年“非洲雄狮”演习中,美军空降部队主要围绕无人系统侦察、作战识别

和任务指挥等方面进行训练,明确提出压缩“传感器到射手”的时间,这使无人侦察节点发现的有价值信息能更快传递给火力和机动力量。整个演习过程中,指挥员保留关键决策权,无人系统负责承担信息筛选和方案推荐,二者配合,大大缩短了作战链路时间。

——无人载具承担高风险突击任务,降低人员伤亡。

探测、火力侦察和进入敌方射界,是作战链路中人员伤亡风险较高的环节。无人载具可以先于有人分队进入危险地域,搜索障碍和雷场,诱导敌方暴露火力。

2025年美军“融合计划-顶点5”演习中,美军测试了无人推土机、自主工程勘察车等装备。自主勘察平台先行标绘障碍地带、复杂地形和模拟雷

场边缘,无人推土机随后执行通道风险验证任务,为有人力量通过创造条件。

同一时刻,我们还要认识到,“有人无人混编”并非等同于“有人力量”和“无人平台”的简单叠加,而是针对指挥关系、任务权限和信息流程的系统调整。

2025年,在北约“REPUS 2025”海上无人系统演习中,DELTA系统作为联合多个国家编组的主要指挥中枢,统一协调海上、水下、地面和空中100余套跨域无人平台,集中汇聚各平台的视频信息,检验了系统与北约相关标准的兼容性,形成互为支撑的平台作战体系。

当然,“有人无人混编”的关键仍然在于人的因素,制胜未来战场最终

离不开体系的重要作用。无人平台可以提高战场感知、计算和行动速度,但无法代替指挥员理解作战意图、判断复杂态势和承担决策责任。尤其在面对目标性质不明、战场环境突变以及可能造成附带伤害情况下,最终的决定仍应由人做出。

从无人机拓展空中视野,到无人战车、机器狗伴随地面步兵突击,再到无人系统与有人力量混合编组,如今,“有人无人混编”正由战术试验走向体系运用,并逐步贯通侦察、火力和保障等多个环节。

未来,“有人无人混编”将成为战场作战新常态,不过,决定最终胜负的,仍然是人,是人的创造力、机器的执行力与作战体系韧性的深度融合。(作者单位:国防科技大学)