

“星链”威胁启示下的新型空天防御技术研究

顾村锋, 杨 阳, 杨博文, 强佳久, 贾宇航

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 作为美军布局空天战场的关键支撑,“星链”系统通过渗透“侦、控、打、评、保”等作战环节,将可能颠覆现有作战模式并打破未来大国间的能力平衡。为此,首先介绍了“星链”系统的基本属性、发展现状与能力特点,其次根据俄乌冲突战例研究其未来作战应用模式,并在此基础上分析“星链”对未来空天局势的威胁,最后提出针对性的新型空天防御技术,为“星链”影响下的空天安全建设提供依据。

关键词: “星链”系统; 通信卫星星座; 军事应用; 空天防御技术

中图分类号: TN 9272; E 962 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4641(2024)02-0008-08

Research on New Aerospace Defense Technologies Inspired by the Threat of Starlink System

GU Cunfeng, YANG Yang, YANG Bowen, QIANG Jiajiu, JIA Yuhang

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: As a core technique for the US military's layout of the aerospace battlefield, the Starlink system will likely subvert the current operational model and break the balance of major powers by penetrating reconnaissance, command, striking, assessment, support and other operational links. This paper has reviewed the basic attributes, development status and capability characteristics of the Starlink system, analyzed its future operational application model referring to the Russia-Ukraine conflict cases, evaluated the threat of Starlink under the future aerospace situation, and proposed targeted new aerospace defense technology. It thus provides the references for the construction of aerospace security under the impact of Starlink.

Keywords: Starlink system; communication satellite constellation; military application; aerospace defense technologies

0 引言

“星链”(Starlink)系统旨在构建全球覆盖的天基互联网,其卫星采用低地球轨道或极低地球轨道,具有可批量制造、发射便捷、通信容量大、传输时延小等特点^[1]。自2015年被提出以来,“星链”系统便受到美国政府、军方与资本市场的大力支持,在系统建设、全球经营和应用开拓等方面长期保持引领地位^[2]。“星链”系统的逐步完善有效增强了全球互联互通能力,同时将导航、指控、情报等作战单元串联为有机整体,这对未来空天作战将产生深远影响。

1 “星链”系统

1.1 “星链”系统概述

2015年,美国太空探索技术公司(SpaceX)正式提出“星链”概念,通过成千上万颗低轨卫星组网协同构建全天时、全天候、全覆盖的低成本卫星通信网络^[3-4]。截至2023年10月,“星链”系统共进行110余次发射,总计发射卫星数量已超过5 200颗^[5]。典型的“星链”系统由空间段和地面段组成,空间段指分布在不同轨道面的卫星星座,用于完成用户端和网关站间的数据

收稿日期: 2023-11-28; 修订日期: 2024-02-27

基金项目: 中国航天科技集团有限公司上海航天科技创新基金(SAST2021-052)

作者简介: 顾村锋(1982—),男,博士,研究员。

中继;地面段指用户端、网关站和测控站,用户端发起通信请求,网关站提供互联网接口,测控站实现卫星定位、跟踪、遥测和控制。“星链”系统连接示意图如图1所示。

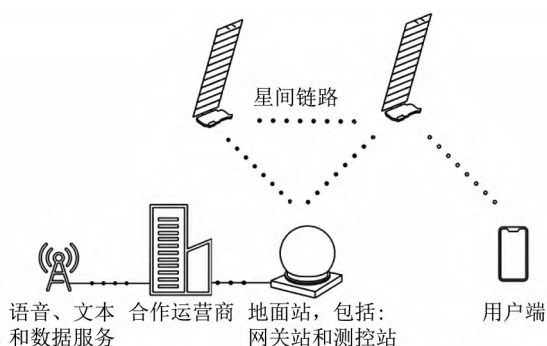


图1 “星链”系统连接示意图

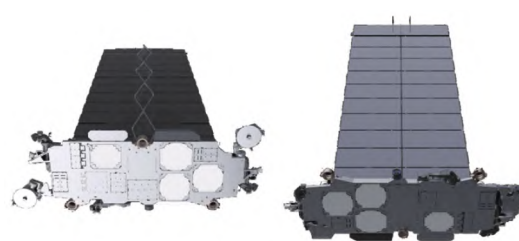
Fig. 1 Starlink system connection schematic diagram

通过空间段和地面段设备的协同,“星链”服务已覆盖超过60个国家/地区,用户数量突破200万^[6],成为全球低轨卫星通信领域的引领者。2022年12月,SpaceX公司进一步提出“星盾”(Starshield)计划,基于“星链”平台部署军用载荷,为美国政府、军方提供加密通信、情报等服务,进一步加速低轨卫星军事化转型发展。

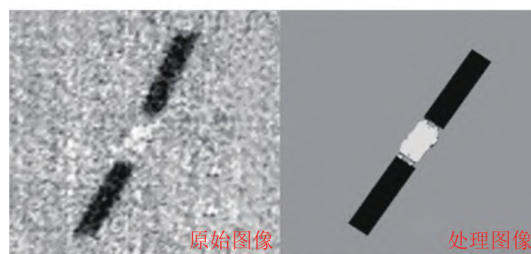
1.2 “星链”系统参数及规模

“星链”系统卫星经过多次设计迭代,已形成两代架构方案。第一代“星链”卫星以快速组网和拓展覆盖为特点,采用4天线相控阵体制,通过Ku和Ka频段分别实现用户和地面网关的高速通信,单星通信容量约为20 Gbit/s,覆盖直径超过500 km的区域^[7]。第二代“星链”卫星以提升用户使用体验为核心,开展卫星平台及星座设计优化,增设E频段天线以提高卫星与地面网关通信带宽,加大Ku频段天线尺寸以期实现手机直连卫星的能力^[8],单星整体通信能力相较第一代提升了3~9倍。两代架构“星链”卫星外形图如图2所示。

根据SpaceX公司向美国联邦通信委员会(FCC)和国际电信联盟(ITU)提交的申请,“星链”系统组建大致分为3个阶段。第1阶段,在550 km高度的72个轨道面上部署约1 600颗卫星,以满足美国本土互联网需求;第2阶段,在540~570 km高度的轨道部署约2 200颗卫星,拓展高纬度地区覆盖并提高中低纬度地区通信质量^[9];第3阶段,在约350 km高度的轨道部署2.4万颗极低轨卫星以及在500~600 km高度的轨道部署约4 000颗卫星,实现包括两极地区在内的全球



(a) 第一代“星链”卫星渲染图像



(b) 第二代“星链”mini卫星实拍及处理图像

图2 两代架构“星链”卫星外形

Fig. 2 Two-generation starlink satellite architecture appearance diagram

高速、低延迟通信^[10]。“星链”卫星星座结构示意图如图3所示。“星链”系统轨道分布情况见表1。

Ookla公司关于“2023年卫星通信性能”的报告显示,在调查的27个欧洲国家中有14个国家使用“星链”系统的中位数下载速度超过100 Mbit/s,有11个国家的网速超过该国的固定宽带速度^[11]。此外,随着用户数量不断增多,“星链”系统通信性能未见下降,这表明“星链”系统建设取得了实质性效果。

对比传统的通信方式,如5G网络与固定宽带,目前“星链”系统虽然在通信时延、可靠性等方面还存在差距(见表2),但其核心优势在于低成本的全球覆盖和快速补网升级。基于上述优势,“星链”系统将成为未来实现万物互联的有力补充和可行替代手段。

1.3 “星链”系统能力特点

(1) 全球覆盖:通过在轨组网,“星链”系统已实现全球网络连续覆盖,具备全球服务能力,尤其在纬度30°~60°的中纬度地区,任意时刻可用卫星数量不小于2颗^[13]。当“星链”系统完全部署后,还将进一步提升赤道及两极地区的覆盖率,实现高密度的全球覆盖。

(2) 成本可控:发射方面,采用火箭重复使用技术,同时通过匹配设计提高火箭负载仓利用率;轨道运行方面,采用先进氦/氙离子电推进发动机;批产制造方面,大量采用标准化、商业化部件。通过多种降本技术集成,“星链”单星的生产 and 部署成本低于100万美元。SpaceX公司可回收运载火箭发射场景图

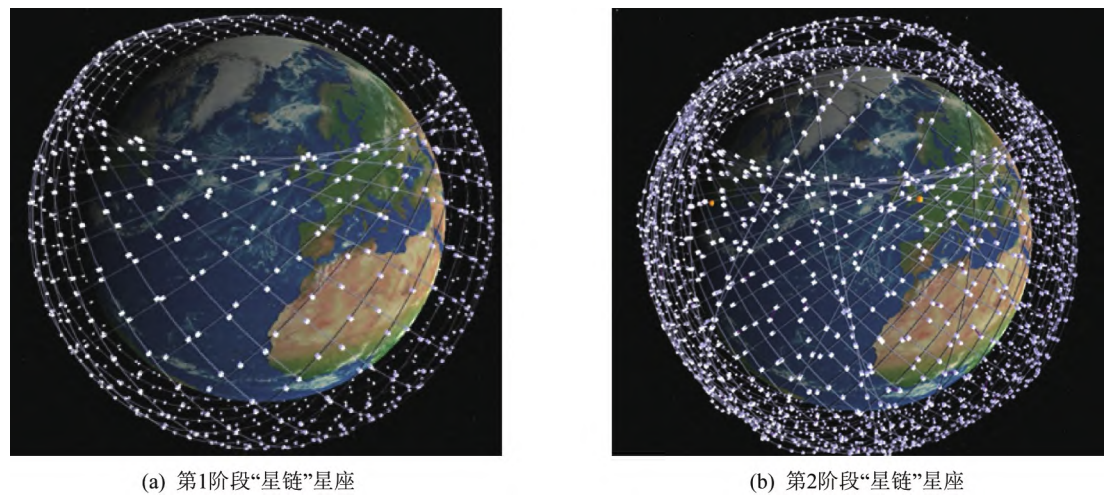


图3 “星链”卫星星座结构^[12]

Fig. 3 Starlink satellite constellation structure schematic diagram^[12]

表1 “星链”系统轨道分布情况

Tab. 1 Starlink system orbit distribution

阶段划分	时间周期	工作频段	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	数量/颗
第一阶段	2019-05至2021-05	Ku/Ka	550	53.0	1 532
			570~580	53.0	52
第二阶段	2021-09至2023-05	Ku/Ka/激光	540~550	53.2	1 584
			560	97.6	230
			570	70.0	408
第三阶段	2022-12起	Ku/Ka/E/激光	525	43.0	65
				53.0	127
			530	43.0	720
			560	43.0	496
				97.6	230

注:数据截至2023年11月。

表2 5G网络、固定宽带与“星链”系统性能对比

Tab. 2 Comparison of the performance of 5G network, fixed broadband and Starlink system

类型	工况	时延/ms	下行/(Mbit·s ⁻¹)	上行/(Mbit·s ⁻¹)	丢包率	通信距离/km	适用场景
5 G网络	实际性能	10~150	50~300	5~50	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴	0.5~3	移动宽带通信、智能工业通信
	峰值性能	1~10	500~1 000	100~200	10 ⁻⁵		
固定宽带	实际性能	5~30	100~500	20~100	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	15~50	远距低时延通信、宽带稳定通信
	峰值性能	1~5	>10 ⁴	>2×10 ³	10 ⁻⁵		
“星链”系统	实际性能	20~100	30~100	5~30	10 ⁻¹ ~10 ⁻⁴	>1 000	全球通信、特殊通信
	峰值性能	15	250	50	10 ⁻³		

如图4所示。

(3) 高速低时延:已开通服务的国家/地区中,“星链”系统的峰值下行速率大于200 Mbit/s,时延一般控制在50 ms以内。随着新一代卫星的入轨,“星链”系统整体能力将向5G移动通信看齐^[12]。

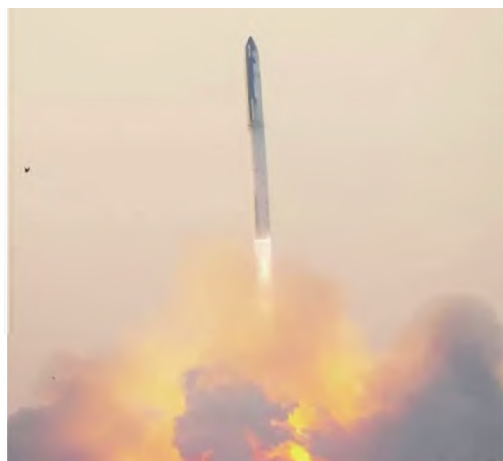
(4) 系统强鲁棒:“星链”系统采用多星座组网方式,个别卫星的失效不会影响其整体性能^[14],同时通过自身携带的推力系统,卫星可实现自主变轨,快速

补网重构,增加了整个系统的灵活性与可靠性。

(5) 接入使用便捷:不同于传统的卫星通信服务商,如“铱星”(Iridium)、“全球星”(Globalstar),需使用专用的硬件实现通信,使用场景较为有限^[15]。“星链”系统通过网络订购、快递上门、自主安装的方式极大地降低了卫星通信的使用门槛,用户只需按照说明书完成天线和调制解调器的设置便可接入网络。“星链”用户端架构如图5所示。



(a) 猎鹰-9运载火箭(Falcon-9)



(b) 下一代运载火箭“星舰”(Starship)

图4 SpaceX公司可回收运载火箭发射场景

Fig. 4 SpaceX's reusable launch vehicle launch scene picture



图5 “星链”用户端架构(收发天线、路由器)

Fig. 5 Starlink terminal structure (transmitting/receiving antennas, routers)

(6) 载荷升级潜质:低轨卫星的研发周期比中高轨卫星更有先天优势,“星链”卫星进一步采用模块化设计思想,便于集成新型载荷。在俄乌冲突期间,“星链”遭受俄电子战干扰后快速恢复服务的事件表明,“星链”系统具有在轨重构能力,可以随时根据需求进行软件修改,适应性地调整工作模式。

2 “星链”系统作战潜能分析

2.1 “星链”系统在俄乌冲突中的运用

2022年2月26日,在俄乌冲突爆发两天后“星链”系统正式介入战场,为乌克兰军队(以下简称“乌军”)提供情报侦察、无人作战和精准打击等方面的保障,展示了其巨大的军事应用价值和潜力。

(1) “星链”系统维持乌军战场通联,即使基础通信设施损毁殆尽,乌军仍能保持与前方作战人员和后方指挥部的作战信息交互^[16]。一方面,“星链”系统卫星能够满足在乌服务的过顶密度要求;另一方面,通

过调用邻国波兰和立陶宛的网网站,“星链”系统卫星可实现在乌服务直接落地或星间路由远程落地。无人机视角下的星链终端如图6所示。



图6 无人机视角下的“星链”终端

Fig. 6 Starlink terminal from the perspective of a drone

(2) “星链”系统赋能情报传递,帮助乌军重获战场制信息权,提升作战规划和军力部署的准确性、及时性。接入“星链”系统后,乌军能够接收北约多型预警/侦察机的时敏情报,并在地面部队的支撑下完成远程预警、机动防空、“亚速营”要地固守、对海精打等任务,有效延缓了俄军作战进程。图7为正在使用星链终端的俄乌士兵。

(3) “星链”系统渗透作战各环节,助力乌军初步实现无人化作战,并向智能化作战持续靠拢。在乌发起的多个打击行动中,大量无人作战单元在“星链”系统的中继下完成了空、地、海多维度协同^[19],并获取精确目标指示支撑高效打击。

2.2 “星链”系统作战应用考虑

“星链”系统具有高通量、低时延、广覆盖等特点,

图 7 正在使用“星链”终端的俄乌士兵^[17-18]Fig. 7 Pictures of Russian and Ukrainian soldier using Starlink terminal^[17-18]

具备为军事行动提供高效天基信息服务的巨大潜力,具体表现为通信保障、支撑精打、网电对抗、链路赋能、能力生成 5 个方面。

(1) 全域可靠通信。“星链”系统提供低成本、无死角、低时延、高通量的全球互联网与卫星通信服务,无人机、战略轰炸机、航母战斗群、核潜艇可随时随地连接“星链”系统,进一步增强美军从指控中心到武器装备的全域联通能力,助力实现高价值装备化整为零,核心指控人员极限后置的愿景。

(2) 支撑精确打击。“星链”卫星可对全球定位系统(GPS)信号进行中继和增强,提升导航定位系统的精确度和抗干扰性能,从技术上分析,其可实现 30 cm 以内的定位精度。此外,基于“星链”卫星颠覆性的数据率优势,可实现无人装备的快速精准控制^[20-21],改进大规模无人化、智能化作战的薄弱环节,制胜未来战场。

(3) 网络电子对抗。“星链”系统的出现为太空攻防作战提供了平台基础,凭借多轨道部署、大范围机动、电磁调控灵活的优势,“星链”系统可通过电磁波等软杀伤方式抵近干扰敌对卫星信号、削弱其通信与导航能力。另外,基于“星链”系统的泛在网络接入能力,美军可在赛博空间内对各国进行隐蔽探测和信息篡改,对网络空间安全造成巨大威胁。

(4) 全链路赋能。通过对天基资源的综合调度,美军将形成全域态势共享、多兵种联合作战的 OODA (Observe, Orient, Decide, Act) 快速闭环能力^[22]。“星链”系统一方面发挥通信枢纽作用,实现天地通信增强和全球高速互联,使跨系统协同延时降至毫秒级,提高作战资源响应速度和利用率,另一方面充当分布式感知、存储、计算节点,实现对监视原始信息的加速处理和融合处理,将分散的作战单位聚能增效,提升

作战应用可靠性。

(5) 新型能力生成。通过新型载荷集成以及驱动优化,“星链”具备完成新任务的潜能。例如,通过搭载红外载荷实现全球覆盖的空间活动监视^[23-24],其对火箭发射预报的时效和精度是高轨预警卫星难以企及的;通过搭载可重构芯片,完成在轨天线重定义,应急形成对空对地的侦查、预警甚至拦截能力。

3 “星链”系统对空天局势的影响分析

基于庞大的星座规模、抗毁的宽带链路、快速的人轨补网、灵活的载荷搭载,“星链”系统具备显著的军事运用背景,可在多个方面对全球空天态势造成影响。

3.1 空间建设方面

在空间建设领域,卫星轨位和通信频率按照“先占先得”的原则在 ITU 的指导下进行分配。为保障各国卫星的运行环境,不同频率和轨道需设置必要的间隔,这使得原本有限的近地轨道资源与太空资源更加紧张^[25]。“星链”卫星数量不断上升,帮助美国获取了在太空战略方面的优势,同时极大地增加了其他国家发射入轨卫星的技术、资金和时间成本,进而剥夺他国和平利用太空、建设太空事业的权利,严重威胁他国太空事业发展进程。“星链”卫星数量统计图如图 8 所示。

3.2 轨道安全方面

根据 SpaceX 公司向 FCC 提交的报告,2022 年 12 月 1 日至 2023 年 5 月 31 日期间,“星链”卫星被迫变轨 25 299 次,平均每颗卫星变轨了 12 次^[26]。由于“星链”系统的规模仍在不断扩大,未来势必会增加与其他在

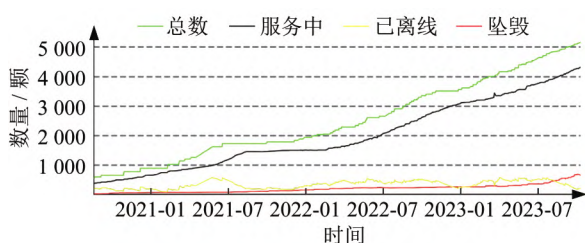


图8 “星链”卫星数量统计

Fig. 8 Statistics on the number of starlink satellites

轨卫星的避障次数,进而对卫星设计冗余提出更高要求,导致既定在轨任务提前结束^[27]。此外,由于SpaceX公司与美国国防部存在密切合作,未来的“星链”或类似系统将可能作为平台,搭载电磁波干扰、激光等软杀伤载荷,通过组网协同方式,对在轨的卫星甚至弹道目标实施干扰或破坏,严重影响近地轨道空间安全。

3.3 信息管控方面

“星链”系统作为全球化的通信服务中心,可通过技术手段获取所中继的文字、音频、图像等碎片信息,实现大数据分析用户画像、通信环境反演、物理行为推测,成为广域泛在的信息感知源和泄露源,对用户使用国的信息安全造成不利影响。目前,“星链”服务用户数量已超过200万,俄乌冲突开始后乌克兰境内“星链”终端已超过4.2万台,且该数字仍在持续增长,若继续放任“星链”系统在各国的渗透,机要信息的被动泄露将难以避免,这会严重威胁商业或军事方面的信息安全^[27]。

3.4 军情隐蔽方面

基于空间轨道密集分布,“星链”系统打破传统中高轨侦察卫星的过顶时间限制,可针对特定区域完成连续的多视场覆盖,降低对手发动军事行动的突然性;基于高通量、低时延的全球通信网,“星链”可将捕获的原始数据传输至云端,大幅减少数据抽取和压缩导致的信息丢失,助力实现战场信息单向透明;基于成熟的“动中通”能力,“星链”可作为中继,远程遥控无人机侦察编队近距离窥探对手装备部署和人员配置情况;基于主动辐射能力,“星链”可适应性修改软件模块以形成一定的电磁探测能力,在星间链路的支撑下甚至可实现雷达孔径合成和多基联合探测,大幅提高目标分辨率和探测精度。可搭载侦察载荷的星盾卫星外形如图9所示。

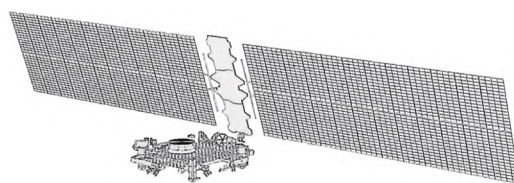


图9 可搭载侦察载荷的星盾卫星外形图

Fig. 9 Starshield satellite capable of carrying reconnaissance payload

3.5 多域对抗方面

“星链”系统有力地支撑了军事集团在全球多个战线同时作战的能力。针对多点低烈度冲突,“星链”通过与无人机动平台铰链,实施以无人智能作战为主、以后方人员监督为辅的零伤亡、装备低损耗作战;针对多向饱和袭击,“星链”担任空中编队的补充交互节点以及弹群中制导的备用节点,全面提升打击规模和毁坏效能;针对拉锯作战或突袭渗透作战,利用“星链”终端多规格可用、安装便捷的优势,实现在有限支撑条件下构建弹性战术互联网;针对恶劣环境作战,通过全面部署“星链”通信套件,可打破不同兵种因装备和体制限制形成的“信息孤岛”,打通天地链路和军民网电路,形成全域资源敏捷调度优势。

3.6 体系博弈威胁

“星链”系统的应用加速了指挥架构的革新与操控模式的升级,打破了以往烟囱式装备架构与树形指挥控制架构,减少了控制指令的传输层级,实现了空地平台一体互联以及控制指令对武器系统的直接指挥。同时,“星链”与装备的紧密连接将极大地压缩威胁认知、判断决策、对抗效果评估的反应时间,加快体系运转速度,形成压倒性的决策优势^[28]。未来,在“星链”系统的支撑下,指挥官可联合全域的有人/无人装备,并与其他力量协同,通过综合运用各领域的力量实现由“杀伤链”到“杀伤网”的升级蜕变,使对手作战体系崩溃瘫痪。

4 针对“星链”系统的新型空天防御技术

“星链”系统作为当下低轨巨型星座的典型,依靠庞大的星座数量和智能化技术的应用,形成了去中心、分布式、强抗毁、敏捷灵活和低成本的优势,促使全军种、全地域、全方位地快速联通。为抵消“星链”系统优势,打赢未来无人化、智能化战争,防御方应从体系建设、智能对抗、海量目标跟踪、无人作战等方面重点发展以下技术。

4.1 基于通信各环节的电磁干扰与欺骗技术

为削弱“星链”系统对军事行动的支援助力,需针对“星链”系统运行各环节开展电磁域干扰与欺骗。针对星地建链环节,深化以GPS为重点的定位干扰与欺骗技术,破坏用户端天线指向校准逻辑,迫使卫星通信质量下降;针对终端请求环节,通过隐蔽监听建立握手信息库,支撑中继节点伪装技术突破,借助空天平台实现通信链路劫持;针对系统接收处理环节,利用申报信息获取卫星轨道、频谱资源分布,推进压制型与欺骗型干扰技术针对性的发展,从而破坏“星链”系统的关键链路。

4.2 基于反侦察截获的信息隐蔽与捷变技术

在“星链”系统全域高密度分布的背景下,需充分隐蔽敏感信息,保障防御作战的战略优势。一是突破兼容当前装备体系的信息级加密技术,增加非合作用户解析成本;二是基于智能反演技术推进电磁与光学反侦察、反识别研究,通过插入特定信息隐蔽真实特征;三是瞄准电磁能量管理,着力突破雷达与通信能量主动消隐与捷变技术,实现期望方向关键参数纳秒级捷变,非期望方向主动波形调制,从而大幅增加信号被侦察截获的难度。

4.3 基于群目标高精度监测的空间机动躲避技术

随着商业航天技术的日益普及,空间威胁数量将呈现指数级增长态势。为维护空间运行秩序和空间力量安全,一方面需加快超大群目标监测技术落地,基于多源感知与大数据处理,形成特定空域全天候实时轨迹、姿态、加速度等运动参数跟踪能力,实现近地轨道目标变轨即时预警;另一方面需推进空间长续航机动技术研究,完善先进电推发动机、燃料在轨加注、适应大机动的载荷结构设计等领域的布局,使卫星全生命周期规避碰撞与伴飞风险,同时提升在轨体系的弹性重构能力。

4.4 基于资源制衡的大型星座构建与入轨技术

为制衡“星链”系统的多方优势,维护空间发展应有的权利,各国亟须获得独立自主的“星链”技术,可采取发射构型规范化、运载接口通用化、卫星设计系列化、解锁分离简洁化和运行管理自主化等一系列措施提高卫星的智能化、集成化水平,进而提高星座的建设效率、安全性,降低星座的建设成本,同时为集成

新型载荷,提升星座新质能力提供条件。另外,加快研究可回收重复使用火箭技术和多星批量发射部署技术,从而快速构建国家级星座群,掌握太空领域的主动权,增强太空领域的竞争力。

4.5 基于智能自适的空天防御体系指控与决策技术

基于“星链”系统的持续侦察和快速通信,敌对势力将获得强大的信息优势。为捍卫国家领土完整,空天防御主体应以鲁棒指控技术为基础,以多源异构感知信息为输入,拓远感知边界、加快识别速度、提高行为预测精度,同时使用智能计算技术辅助指挥官形成动态调优的作战策略,通过灵活调度装备组建防御力量体系,以复杂作战行动迟滞对手决策,重点突破泛在网络情报挖掘与认知处理、态势精准评估与预测、多约束方案生成与增量优化、作战指控人机交互等技术,以多技术聚能增效,保障空天地海网电各领域行动自由。

5 结束语

“星链”系统具备强大的作战应用价值和潜能,是太空安全战略转型的重要载体,随着“马赛克战”等新型作战样式在军事领域的应用,它还将在大国竞争中扮演不可或缺的角色,极大地改变未来作战的样式和战争的形态。各国应统筹规划、加快技术布局,针对以“星链”为典型的巨型卫星星座,开展空天态势分析,研究应对措施,维护国防安全和太空权益,从而保障国家战略安全。

参 考 文 献

- [1] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.
- [2] PETROVA M. Starlink's rapid growth and influence has made it an indispensable part of Elon Musk's SpaceX [EB/OL]. (2023-11-11)[2023-11-25]. <https://www.cnbc.com/2023/11/11/the-rapid-rise-of-elon-musks-starlink-satellite-internet-business.html>.
- [3] PAOLETTA P. Application for fixed satellite service by space exploration holdings [EB/OL]. (2016-11-15)[2023-11-25]. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118>.
- [4] DE SELDING P B. SpaceX to build 4,000 broadband satellites in seattle[EB/OL]. (2015-01-21)[2023-11-25]. <https://www.space.com/28305-spacex-satellite-internet-seattle.html>.
- [5] SatelliteMap. List of starlink launches and status today[EB/OL]. (2023-11-20)[2023-11-25]. <https://satellitemap.space/starlink/launches.html>.

- [6] JEWETT R. Starlink surpasses 2 million subscribers[EB/OL]. (2023-11-25)[2023-11-25]. <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2023/09/25/starlink-surpasses-2-million-subscribers/>.
- [7] 李元龙, 李志强. 基于STK的Starlink星座覆盖仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(1): 119-129.
- [8] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink第二代系统介绍[J]. 卫星与网络, 2020(12): 62-65.
- [9] WILTSHIRE W. Application for fixed satellite service by space exploration holdings [EB/OL]. (2018-04-24) [2023-11-25]. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037>.
- [10] WILTSHIRE W. Application for fixed satellite service by space exploration holdings [EB/OL]. (2020-05-26) [2023-11-25]. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20200526-00055>.
- [11] FOMON J. New speedtestdata shows starlinkusers love their provider[EB/OL]. (2023-05-08)[2023-11-25]. <https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q1-2023>.
- [12] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space [C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. Redmond, Washington: ACM, 2018: 85-91.
- [13] 龚宇鹏. 低轨巨型星座构型设计及覆盖分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [14] 陈东, 裴胜伟, 黄华, 等. 全球巨型低轨星座通信网络发展、特征与思考[J]. 国际太空, 2020(4): 42-47.
- [15] 杨阳. 多功能通信载荷智能天线处理系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [16] 王太军, 唐麟斌, 周超. “星链”在俄乌军事冲突中的应用探研[J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1006-1013.
- [17] BURDINA E. IT-взвод на службі в ЗСУ: Як project manager Роман Перімов зібрав підрозділ з 30 айтівців[EB/OL]. (2022-05-23)[2023-11-25]. <https://dou.ua/lenta/articles/it-platoon-in-ukrainian-forces/>.
- [18] WEBER P. Elon Musk used Starlink, which saved Ukraine, to thwart a Ukrainian attack on Russia's Crimea fleet[EB/OL]. (2023-09-07)[2023-11-25]. <https://ca.news.yahoo.com/elon-musk-used-starlink-saved-052755718.html>.
- [19] 远望智库. “星链”在俄乌冲突中的应用及启示[J]. 国防科技工业, 2022(6): 42-43.
- [20] 曹渊哲, 王家丰. 星链技术在无人机作战中的应用研究[J]. 军事文摘, 2023(17): 27-30.
- [21] WADHWA V, SALKEVER A. How Elon Musk's Starlink got battle-tested in Ukraine[EB/OL]. (2022-05-04) [2023-11-25]. <https://foreignpolicy.com/2022/05/04/starlink-ukraine-elon-musk-satellite-internet-broadband-drones/>.
- [22] 丰松江. “星链”可能成为美军未来作战理念新载体[N]. 解放军报, 2020-07-16(11).
- [23] EVANS B. SpaceX launches sixth classified payload, reflies falcon 9 booster[EB/OL]. (2022-04-17) [2023-11-25]. <https://www.americaspace.com/2022/04/17/spacex-launches-sixth-classified-payload-reflies-falcon-9-booster/>.
- [24] GAULT M. Elon musk doubles down on military with starlink spinoff 'starshield' for national security [EB/OL]. (2022-12-07) [2023-11-25]. <https://www.vice.com/en/article/m7gnep/elon-musk-doubles-down-on-military-with-starlink-spinoff-starshield-for-national-security>.
- [25] 陈瑛, 卫国宁, 唐生勇, 等. 国际太空安全形势分析与发展建议[J]. 空天防御, 2021, 4(3): 99-104.
- [26] GOLDMAN D. SpaceX gen 1 constellation status report [EB/OL]. (2023-06-30) [2023-11-25]. https://licensing.fcc.gov/myibfs/download.do?attachment_key=23204338.
- [27] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlinkconstellation [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L36.
- [28] 汪培豪. 总体国家安全观视域下“星链”的挑战及应对[J]. 网络安全技术与应用, 2023(12): 169-171.
- [29] 邢强. 低轨巨型星座的建设及其影响分析[J]. 中国航天, 2019(12): 43-47.