

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.014

美国导航战新进展与启示

唐斌, 郑冲, 章林锋, 王正

(32021部队, 北京 100094)

摘要: 针对卫星导航系统的脆弱性, 美国首先提出了导航战的概念。近几年来, 美国密集制定了多项有关导航战的政策文件, 不断丰富和发展导航战理论与技术, 同时将导航战加入到作战演习和部分实战中。从梳理导航战技术现状入手, 进而阐述了美国导航战条令与政策的最新进展, 分析了近年来美国导航战演习与作战应用实践, 最后总结并提出了美国导航战发展启示。

关键词: 美国; 导航战; 政策; 实战

中图分类号: P228

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)04-0110-07



New Progress and Implication of United States Navigation Warfare

TANG Bin, ZHENG Chong, ZHANG Lin-feng, WANG Zheng

(Unit 32021, Beijing 100094, China)

Abstract: In response to the vulnerability of satellite navigation systems, the concept of navigation warfare was first proposed by the United States. In recent years, a number of policy documents on navigation warfare have been intensively formulated by the United States, the theory and technology of navigation warfare are continuously developed and used into combat exercises and some actual combat. This paper starts from sorting out the current situation of navigation warfare technology, and then expounds the latest progress of US navigation warfare doctrine and policy, analyzes the US navigation warfare combat exercises and operational practice in recent years, and finally summarizes and puts forward the enlightenment of the development of US navigation warfare.

Key words: United States; Navigation warfare; Policy; Actual combat

0 引言

卫星导航系统可提供全天候的高精度、实时定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服务, 20世纪90年代, 美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)建成并投入使用, 并且在伊拉克、科索沃、阿富汗、利比亚、叙利亚

等一系列局部战争中广泛应用, 已经成为决定现代战争胜负的关键因素。但是, 由于卫星导航系统自身的脆弱性, 针对该系统易受干扰的实际情况, 美军开始对GPS的电子防护和抗干扰技术展开研究, 推动了导航战的发展^[1-2]。1997年, 美国正式提出了导航战的概念, 并将其定义为: 阻止敌方使用卫星导航信息, 保证己方和盟友部队可以有效地利用

收稿日期: 2019-05-22; 修订日期: 2019-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61603397)

作者简介: 唐斌(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事卫星导航信号处理与导航战应用等方面的研究。

E-mail: donaldbgns@126.com

卫星导航信息,同时不影响战区以外区域和平利用卫星导航信息^[3-4]。美国还确立了导航战的作战目标,即:“在战场上取得导航优势;确保GPS正常运行,使美军和盟军不受干扰地使用该系统;阻止敌军在战场上使用GPS,并使敌方的卫星导航系统不能正常工作或不能正常使用其服务”^[5]。近年来,伴随第1颗全面贯彻美军新世纪导航战思想的GPS III卫星的发射,美国密集制定了多项有关导航战的政策文件,不断丰富和发展导航战理论,同时将导航战加入到作战演习和部分实战中,表明美国已将导航战列为继电子战、信息战及网络战之后提出的新的作战样式。

本文从梳理导航战表现形式与技术现状入手,进而阐述了美国导航战理论与政策的最新进展,以及近年来美国导航战演习与作战应用实践,最后总结并提出了美国导航战发展启示。

1 导航战表现形式与技术进展

1.1 导航战表现形式

导航战的核心就是阻止和保护,阻止就是阻止敌方使用卫星导航信息,可以归为进攻导航战;保护就是保证己方有效地利用卫星导航信息,可以归为防御导航战^[6]。因此,从表现形式上,导航战可以分为进攻型导航作战和防御型导航作战。

卫星导航系统一般由空间段(卫星星座)、控制段(地面控制/监测网络)和用户段(用户接收机)3个段组成。它们都可以被攻击或进行防御。

1) 空间段攻击与防御

针对空间段攻击,可以使用反卫星武器直接摧毁,或者使用电磁武器进行干扰。针对空间段的防御措施主要是使用在轨备份卫星或补充发射新的卫星。针对导航卫星的干扰式进攻,可采取的防御措施是对导航卫星进行一定的电磁或激光加固^[7]。

2) 控制段攻击与防御

针对控制段的攻击有2类,一类是对主控站、监测站和注入站进行直接摧毁以使地面站不能工作,或者进行网络攻击破坏使其向卫星注入错误信息;另一类是干扰监测站对导航卫星信号的接收,以使主控站不能获得正确的卫星轨道信息。针对控制段的直接破坏防御,主要是在广阔的区域进行站点冗余配置;对于干扰则需要对遥测与通信链路进行加密保护等^[8-9]。

3) 用户段攻击与防御

当前对卫星导航用户的干扰主要是通过辐射干扰信号,来压制或欺骗敌方的导航接收机。用户段防御除了研制抗干扰反欺骗接收机外,还可以在导航信号源头实施,如增大卫星发射信号功率、研制新型卫星信号和采用伪卫星技术等^[10]。此外,还可以采用其他导航系统进行辅助和备份。

不管是实施进攻型导航作战或是防御型导航作战,都需要相应的导航战技术手段作为支撑。导航战技术手段深刻影响着战场对抗环境下PNT服务的可用性与稳健性。从具体技术层面来说,又分为卫星导航系统层面的导航战技术和卫星导航拒止条件下的导航战技术。

1.2 卫星导航系统导航战主要技术进展

1) 空间段主要导航战技术进展

空间段导航战技术主要通过优化导航信号体制、卫星升级换代、区域信号功率增强、导航拒止技术、卫星自主导航技术等,提高导航卫星自身生存和抗干扰能力^[11]。

美国GPS最新一代GPS III卫星于2001年开始实质性的研制,就目前的信息来看,GPS III共有36颗,包括A、B、C三种类型。其中,GPS III A卫星12颗,GPS III B卫星8颗,GPS III C卫星16颗,第1颗GPS III卫星已经于2018年12月完成首次发射^[12]。GPS III卫星除通过增发无数据调制的导频信号,将军用信号和民用信号的频谱分开,提高导航信号的安全性和可靠性外,在区域信号功率增强、卫星自主导航技术等方面也有较大提升,同时卫星在轨可重新编程与信号重构技术也有望在GPS III卫星上启用。

卫星信号功率增强是提高系统导航服务抗干扰能力的重要手段之一。美国正在发展的功率增强技术包括星上信号功率可调技术和点波束增强技术两种技术途径。星上信号功率可调技术利用星上控制系统与相关的星上功率管理程序实现,技术难度较小,但星上信号功率增加幅度有限,如美国GPS IIF卫星利用星上信号功率可调技术仅能实现7dB的功率增加。相对于星上功率可调技术,点波束增强技术功率增强幅度大,但是需要专用有效载荷的支持。GPS III C卫星将采用点波束增强技术,可在点波束的覆盖区域内实现军用信号功率增强20dB^[11]。

导航拒止技术是用于阻止敌方使用己方卫星导航能力的技术。对美国而言,阻止、拒绝敌方使用

GPS已经成为美国对敌方实施综合打击、破坏或制约敌方战争潜力的重要打击手段。从GPS II F卫星开始,可通过降低民用信号功率,提高军用信号播发功率,使相关区域内的民用GPS接收设备无法跟踪、锁定GPS民用信号,实现对敌方使用GPS服务的拒止。未来,GPS III卫星将全部拥有该能力,预计到2025年左右GPS将全面拥有导航拒止能力。

卫星自主导航等技术通过星座卫星间的自主网,实现卫星星历的自主更新,进而提高卫星星座的自主运行能力。采用自主导航技术,在没有地面控制系统支持的条件下GPS II F卫星可以保持运行180天且用户测距误差不高于6m。GPS III系统则进一步采用新的高速上行/下行链路和星间链路通信结构,这将使GPS III卫星运行发生变革^[11]。可以预见,未来GPS III卫星依托高速星间链路,在实施自主导航时的完好性和可用性必将取得更大进步,从而提高系统的抗毁生存能力。

卫星在轨可重新编程与信号重构技术在功能上是一种类似于软件无线电的技术,可实现导航信号波形和中心频率等多种参数的调整。在GPS受到干扰时,通过调整或改变GPS导航信号的参数,从而提升或增强其抗干扰能力。美国计划在GPS III C卫星上利用软件无线电技术开展在轨可重新编程与信号重构技术的演示验证,项目的研发已经进入关键设计评审阶段。

2) 地面段主要导航战技术进展

网络安全与信息保证是美国新一代运行控制系统(Operational Control Segment, OCX)具备的重要核心能力。GPS的网络安全与信息保证已经成为美国必须解决的问题。GPS新一代运行控制系统设计了多层防护的安全结构,以应对由内部威胁、物理威胁、网络威胁与供应链威胁等构成的安全威胁。

按当前的计划,OCX Block 0已经于2017年底完成交付,以支持2018年GPS III A卫星的首次发射。2020年将完成OCX Block 1和Block 2的交付,使运行控制系统具备全面支持GPS III卫星和M码军用信号、星上信号功率可调等功能的运行^[13]。

3) 用户段主要导航战技术进展

用户设备获取卫星导航信号后,通过算法解算,从而获得自身的位置信息。因此,提升用户段抗干扰能力,首要的是提高设备获取信号和处理信号的能力。因此,美国实施了军用GPS用户装备(Military GPS User Equipment, MGUE)计划,目标是研制一套

现代化的军用GPS接收机,与军用下一代GPS信号M码兼容,并提供增强型的精确、可靠和可用的PNT服务,主要服务于当前接收机无力或无法使用的场景。MGUE计划的五项关键技术是:军码捕获技术、军码加密技术、选择可用性/防欺骗模块加密技术、防篡改技术和防欺骗技术。目前,这些技术已经成熟,并通过时钟发生模块(Clock Generation Module, CGM)予以实现,进入工程研制阶段^[14]。

1.3 卫星导航拒止条件下的导航战技术进展

为了降低对GPS的依赖性,减少GPS脆弱性所带来的风险,美国加大了导航理论的创新研究力度,确保在GPS信号拒止或降级的环境下为各种作战平台提供可靠的导航或制导能力。针对当前GPS易受干扰和攻击的影响,PNT系统需灵活应对多种复杂的战场环境。分析了美国陆军未来发展先进PNT技术的背景,重点分析了美国陆军PNT能力的发展趋势,其中主要包括伪卫星系统、车辆导航系统、惯性导航、定位、导航系统辅助传感器、导航传感器融合、导航仿生技术、授时、PNT建模与仿真、导航战技术应用、自主与人工智能在PNT中的应用等11个方面的发展趋势。还包括伪卫星增强、微PNT组合导航、全源导航、干扰源监测与定位等。

1) 伪卫星增强技术

伪卫星增强技术最早于1982年首次提出,但由于当时的伪卫星用户设备非常昂贵,这项研究工作没有广泛展开。经过几十年的发展,随着用户设备价格的降低,相关产品正朝着高精度、小型化、芯片化和标准化等方向快速发展。当前比较成熟的伪卫星增强系统有澳大利亚的Locata系统、美国的Terralite XPS系统、法国的INOPSYS系统和日本的IMES系统等。

2) 微PNT技术

为了解决卫星导航系统在室内、地下、水下等物理受阻环境以及电子对抗等复杂电磁环境下服务性能严重下降的问题,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出了微型定位、导航与授时系统(Micro-PNT)项目。目前,DARPA的Micro-PNT项目中,芯片原子钟(Chip-Scale Atomic Clock, CSAC)成熟度最高,已经实现了商品化;微型惯性导航技术(Micro Inertial Navigation Technology, MINT)、导航级集成微陀螺(Navigation Grade Integrated Micro Gyroscope, NGIMG)已相对成熟,正在向商品化阶段发展;同时

美国还在继续发展下一代的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)陀螺^[15]。

3) 全源导航技术

DARPA的全源定位与导航(All Source Position and Navigation, ASPN)项目于2010年11月启动,旨在开发一种廉价的导航传感器融合技术,可以与激光测距仪、相机和磁力计等各种传感器实现即插即用的组合,通过使用除GPS卫星之外的其他信号来源进行定位,从而提供高可靠性的导航定位服务^[16]。目前,已完成能够适应多传感器组件、跨平台和环境的导航软件架构和导航算法的设计开发,并对其架构和算法进行了评估,验证结果显示其已具备自适应性和即插即用能力,并初步实现了无GPS服务条件下的精确PNT能力。

4) 干扰源监测与定位技术

关于GPS干扰源监测与定位,已有多个系统投入使用。美国联邦航空管理局部署的GPS干扰源监测与定位实验系统由10个射频干扰源、33个便携式定位系统、200多个手持式定位系统和21个机载设备构成。该系统几乎利用了现有的各种干扰源定位技术,如到达角/到达频率差/到达时间差的结合使用。典型的GPS干扰监测/定位系统还有:美国NAVSYS公司建设的干扰监测定位系统、美国国家大地测量机构基于连续运行卫星定位服务综合系统网络的GPS干扰监测系统。这些典型系统一般采用多个独立天线,具有独立的接收通道,多站组合,对特定区域干扰信号进行监测/定位,其原理与通用的干扰信号监测系统基本相同。

2 美国导航战政策进展

美国在大力发展导航战技术的同时,也适时制定了新的作战条令与政策法案,从整个国家层面推动导航战作战应用。

2.1 导航战逐步成为一种新的作战样式

随着GPS成为美国军事行动的重要保障,军事行动对GPS的严重依赖也使之成为敌方可能攻击的目标。2015年2月5日,美国国防部更新了电子战政策,颁布了新的导航战命令,要求各军种和国防部其他部门在各种军事能力中融入导航战,并且提出了在导航战中提供PNT保障,包括提供非GPS技术的可能性^[17]。

2018年4月10日,美国发布了新版联合出版物JP3-14《太空作战》,作为2013年《美参联会太空

作战联合条令》的升级版,将太空作战从美空军的空天作战理论中正式独立出来,导航战也作为一种太空作战能力被独立列出,并定义为人为的进攻性或防御性军事行动,通过综合利用太空、网络空间和电子战能力,确保己方和友方正常使用并阻止敌方使用PNT信息^[18]。同时,首次明确了在整个太空作战体系框架下,联合导航战中心的主要职能和使命。导航战逐步从太空作战中脱颖而出,成为继电子战、信息战及网络战之后新的作战样式。

2.2 弹性授时战提上作战应用日程

2017年5月10日,美国空军战略与技术中心研究人员首先提出了授时战的概念,并提出美军需重视PNT中的授时信息。美国国防部也认为应该提升授时的地位,将授时从PNT中拆解出来,使得精准授时工作不再被政策、规划、条令等忽视。同时,DARPA也推出了精准授时的相关项目,主要包括:量子辅助传感与读取(Quantum-Assisted Sensing and Readout, QuASAR)项目,超快激光科学与工程(Program in Ultrafast Laser Science and Engineering, PULSE)项目,对抗环境中的空间、时间和方位信息(Spatial, Temporal, and Orientation Information in Contested Environments, STOIC)项目等,加快了对授时战的技术支撑^[19]。

2018年12月4日,美国总统特朗普签署颁布了《国家授时弹性与安全法案》,要求由交通部负责建设、维护和运行具有弹性、可靠的陆基备用授时系统,作为GPS授时手段的备份和支持,以减少对GPS的绝对依赖,确保在GPS授时信号遭到破坏、信号衰减、不可靠、不可用等情况下,依然能够为军方和地方用户提供安全、可靠、可用的高精度授时信号^[20]。这一方案表明美国弹性授时战已逐步提上作战应用日程。

2.3 导航战与太空战、网络战、电子战关系逐步明确

2018年12月27日,美国国防部发布4650.08号指令,即《定位、导航与授时和导航战》法案,取代了2015年相应法案。明确指出:国防部将有效利用导航战能力,确保PNT优势,为军事行动提供保障;将以导航战为手段,综合利用太空战、网络战、电子战等不同作战样式,确保美军正常使用并阻止敌方使用PNT信息;要求所有使用PNT信息的系统都必须能够适应导航战的要求,必须在真实的导航战对抗环境下进行测试;按照信息与技术转让的相关政策、制度和流程,严格控制PNT信息与服务提供和转让的范

围,确保美国及盟国在 PNT 领域的优势地位。

美国近年来的导航战作战条令与政策法案发展表明:随着导航战技术的发展与微型 PNT 核心技术的突破,多源 PNT 的弹性集成,即弹性 PNT (Resilient PNT, RPNT) 服务体系建设已经成为研究热点。导航战逐步成为一种新的作战样式,并与太空战、网络战、电子战相辅相成,一起为联合作战提供战略支撑。未来导航战将利用一切可利用的 PNT 信息源,生成连续、可用、可靠、稳健的 PNT 应用信息,其中连续、稳健和可靠的 PNT 信息生成是弹性 PNT 的核心^[21-22]。

3 美国近期实施的导航战情况分析

3.1 探索天、网、电 3 个作战域的导航战

2015 年 12 月—2016 年 5 月,在相隔不到半年的时间里,美军连续实施了 2 次施里弗空间作战演习,打破了以往每隔 1~2 年开展一次施里弗演习的惯例,创造了新的最短时间间隔记录^[23]。从施里弗-V 开始,美国就着手探索太空和网络空间 2 个作战疆域的作战问题,从最初的概念探索到接近实际作战的场景,并且在天、网、电 3 个作战域集成的基础上,探索对 GPS 卫星的网络攻防想定内容,包括网络攻击 GPS 卫星、欺骗 GPS 信号、使 GPS 卫星将错误的数据提供给精确制导武器等军用 GPS 数据接收端等。

2 次施里弗空间作战演习表明:卫星导航系统的通信、指挥链路正面临着日益严重的网络安全问题,网络安全已经成为 GPS 运行控制系统必须解决的问题。通过作战演习,为 GPS 新一代运行控制系统的建设与发展奠定了基础。

3.2 叙利亚军事打击中的导航战

2018 年 3 月中下旬以来,俄罗斯为对抗美国的无人机,在叙利亚地区对 GPS 信号进行了干扰。4 月 13 日,叙利亚周边的 IGS 站 BSHM 测站出现数据中断现象,GPS 部分卫星 P 码信号功率大幅度增强;4 月 14 日,叙利亚当地时间凌晨 4 点,美国对叙利亚实施打击;4 月 17 日,GPS 信号功率恢复正常;4 月 23 日,地面干扰逐渐减弱^[24]。据此可判断,美军对叙利亚进行军事打击前后,敌对双方上演了 GPS 信号干扰与反干扰的导航战。总之,叙利亚地区经历了俄罗斯对 GPS 信号进行局部干扰,美国实现对 P 码信号增强,美国对叙利亚实施军事打击,GPS 信号功率恢复,地面干扰逐渐减弱,从而形成了一个完整的 GPS 导航战实例。

叙利亚军事打击中的导航战表明:美国已经可以在实战中,灵活地运用各种导航战技术配合地面军事打击,包括区域军用信号功率增强技术和导航拒止技术。

3.3 加快演练在 GPS 受干扰条件下作战应用

美国早就意识到对 GPS 卫星的过分依赖会影响其未来的作战,一方面不断推动 GPS 的更新换代,提高自身的防护能力,另一方面加快探索实践不依赖 GPS 导航的作战应用。尤其是面对俄罗斯在处理乌克兰危机和叙利亚危机过程中展现出了惊人的导航攻击能力,更促使美国各军种加快演练在 GPS 受干扰条件下的作战应用。

美国陆军针对多种复杂战场环境提出了伪卫星系统、车辆导航系统、惯性导航、定位、导航系统辅助传感器、导航传感器融合、导航仿生技术、授时、PNT 建模与仿真、导航战技术应用、自主与人工智能等 11 个方面在 PNT 中的应用,同时着力加强 GPS 干扰环境下部队作战能力的训练^[25]。从 2016 年开始,在加利福尼亚州欧文堡国家训练中心参加演训的旅级部队士兵,需要完成指南针使用、地图阅读、分辨 GPS 失效原因(能够识别是 GPS 故障或敌方刻意干扰),并具备操作主动式电子干扰装备能力等一系列训练科目。2018 年年初,美国陆军在北卡罗来纳州布拉格堡和路易斯安那州波尔克堡等地都举行了 GPS 干扰演习^[26]。

红旗系列演习是美国空军最重要的军事演习,是在近实战环境下实施的高强度空战对抗训练。2018 年 1 月—2 月,美空军联合海军、海军陆战队以及澳洲皇家空军与英国皇家空军,在美国西部内华达州内利斯试验训练靶场,举行了规模空前的红旗 18 演习^[27]。本次演习的重点科目之一是 GPS 干扰环境下的空战组织与实施。参演部队需要在无 GPS 提供 PNT 服务的情况下实施防区外导弹攻击、飞越敌占区进行精确目标打击等作战任务。这种对抗不仅是火力的对抗,也是 PNT 的对抗。

2018 年 9 月,美军航母第 4 攻击群(Carrier Strike Group Four, CSG-4)在美国东海岸组织的 2018 年度第 3 次军演中,假想 GPS 被切断处于不可用状态下的模拟实战演习。2019 年 2 月 6 日—10 日,同样是美军航母第 4 攻击群在美国东南部至加勒比海地区组织的本年度第 1 次演习中,在不同时段对该区域 GPS 信号进行了干扰^[28]。

美国近期实施的导航战战例表明:美国导航战

技术发展已经日趋完善,有着系统的作战条令可供遵循,并且将 GPS 拒止条件下的作战应用作为演习训练的重点。

4 美国导航战发展启示

美国近年来的导航战理论、政策发展与作战应用实践表明:

1)导航战已经成为一种新的作战样式,是美军各战斗单元使用 PNT 的有效性和安全性的较量,是空天作战的重要元素,并且已经发展到覆盖空天、网络、电子 3 个作战域集。

2)美国已经形成了较为成熟的导航战战法,并且可以娴熟地在实战中应用。

3)美国已经认识到战时 GPS 的不可靠性,并且紧抓不依赖 GPS 的作战演练。

针对美国近年来的导航战发展,对于我国研究导航战相关理论和发展相关技术有以下几点启示:

1)导航战已经不仅仅是针对卫星导航系统,而是针对敌对国的所有导航手段和方式开展和进行的,是空天、网络、电子等诸多作战领域的综合攻防对抗。

2)针对卫星导航系统的脆弱性,应充分利用北斗系统的后发优势,有针对性地进行空间段、地面段与用户段加固,但是也应该认识到单纯的卫星导航是无法满足未来战场 PNT 需求的。

3)应该加快发展卫星导航替代手段、增强手段以及隐蔽导航手段,特别要注重 PNT 微技术与相关核心元器件攻关。

4)深入研究美国导航战理论、政策、作战装备及战法,并研究制定应对策略,加快相应的导航战装备建设,不断加强作战演练,提升导航战对联合作战的贡献率。

5 总结

本文围绕导航战的表现形式和技术现状,着重梳理了美国导航战的最新作战条令和政策法规制定进展,并对美国近期实施的导航战情况进行了深入剖析,最后提出了我之发展启示。主要有以下几点结论:一是导航战政策和法律层面,导航战已经成为一种新的作战样式,是针对敌对国的所有导航手段和方式开展和进行的,是多层次、宽领域的综合攻防对抗,需要从国家层面建立统一的理论、政策与发展战略;二是导航战技术应用层面,不管是进攻技术还是防御技术,每一种技术在不同的战场

环境下,实施的难度与效果都不尽相同,如何针对敌方有效地组合各种技术来最大程度地获得战场优势是导航战应用的研究重点;三是未来战场 PNT 需求层面,未来战场 PNT 必须是多源的、可靠的导航定位保障,必须发展弹性、综合 PNT 体系,要注重微 PNT 技术研究与相关核心元器件攻关,大幅提高国产化程度,避免战时受制于人。

参考文献

- [1] Thomas M. Global navigation space systems: reliance and vulnerabilities[R]. The Royal Academy of Engineering, 2011: 951-964.
- [2] United States Government Accountability Office. GPS disruptions: efforts to assess risks to critical infrastructure and coordinate agency actions should be enhanced[R]. Government Accountability Office Reports, 2013: 11-18.
- [3] Covault C. Navigation warfare-as the value of GPS increases, so do attempts to jam the system[EB/OJ]. [2010-11-01]. <https://www.defensem edianetwork.com/stories/navigation-warfare/>.
- [4] 向吴辉,黄辉,罗一鸣.关于导航战概念的探讨[J].现代防御技术,2006,34(5):65-68.
Xiang Wuhui, Huang Hui, Luo Yiming. Discussion about the concept of navigation warfare[J]. Modern Defence Technology, 2006, 34(5): 65-68(in Chinese).
- [5] 李向阳,慈元卓,程绍驰,等.国外卫星导航军事应用[M].北京:国防工业出版社,2016:111-116.
Li Xiangyang, Ci Yuanzhuo, Cheng Shaochi, et al. Foreign satellite navigation military application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 111-116(in Chinese).
- [6] 高书亮.导航战技术现状及其发展趋势[J].卫星与网络,2018(9):58-60.
Gao Shuliang. The status and development trend of navigation warfare technology[J]. Satellite & Network, 2018(9): 58-60(in Chinese).
- [7] 李隽,楚恒林,蔚保国,等.导航战技术及其攻防策略研究[J].无线电工程,2008,38(7):36-39.
Li Jun, Chu Henglin, Yu Baoguo, et al. Study on NAVWAR technology and its attack-defense strategy [J]. Radio Engineering, 2008, 38(7): 36-39(in Chinese).
- [8] 李军正,张伦东,丛佃伟.GNSS导航信息对抗技术研究[J].全球定位系统,2018,43(2):49-53.
Li Junzheng, Zhang Lundong, Cong Dianwei, et al. Research on navigation information confrontation of

- GNSS[J]. GNSS World of China, 2018, 43(2): 49-53(in Chinese).
- [9] 李达. 卫星导航对抗专业领域发展现状及展望[J]. 战略研究, 2017, 61(4): 11-13.
Li Da. Development status and prospects of satellite navigation countermeasure[J]. Strategic Research, 2017, 61(4): 11-13(in Chinese).
- [10] 张鑫. 卫星导航欺骗干扰信号检测技术综述[J]. 全球定位系统, 2018, 43(6): 1-7.
Zhang Xin. Overview of satellite navigation spoofing signal detection technology [J]. GNSS World of China, 2018, 43(6): 1-7(in Chinese).
- [11] 杨宁虎, 刘春保, 杨哲. 美国 GPS 系统导航战技术发展分析[J]. 国际太空, 2017, 468(12): 4-8.
Yang Ninghu, Liu Chunbao, Yang Zhe. Analysis of the development of GPS navigation technology in the United States [J]. International Space, 2017, 468(12): 4-8(in Chinese).
- [12] Henry C. SpaceX launches first GPS 3 satellite[EB/OJ]. [2018-12-23]. <https://spacenews.com/spacex-launches-first-gps-3-satellite/>.
- [13] GPS next generation operational control system[EB/OJ]. [2017-11-03]. https://www.raytheon.com/capabilities/products/gps_ocx.
- [14] The Shephard News Team. The shephard news team [EB/OJ]. [2019-05-28]. <https://www.shephard-media.com/news/digital-battlespace/collins-aerospace-achieves-certification-m-code-cg/>.
- [15] 王冬霞, 郭睿, 毛潇, 等. PNT 体系关键技术研究[J]. 数字通信世界, 2018(4): 1-3.
Wang Dongxia, Guo Rui, Mao Xiao, et al. Key technologies research of PNT system[J]. Digital Communication World, 2018(4): 1-3(in Chinese).
- [16] 刘春保. 美国打造新的军用全源导航[J]. 国际太空, 2013(4): 46-49.
Liu Chunbao. The United States creates a new military all-source navigation[J]. International Space, 2013(4): 46-49(in Chinese).
- [17] Kevin M. DOD puts emphasis on navigation warfare, accurate GPS signals [EB/OJ]. [2015-02-09]. <https://defensesystems.com/articles/2015/02/09/dod-directive-navigation-warfare-pnt-tools.aspx>.
- [18] Joint publication 3-14 space operations [EB/OJ]. [2018-04-10]. https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/jp3_14.pdf.
- [19] 葛悦涛, 薛连莉, 李婕敏. 美国空军授时战概念分析[J]. 飞航导弹, 2018(5): 11-14.
Ge Yuetao, Xue Lianli, Li Jiemin. Analysis of the concept of time warfare in the US air force[J]. Flying Missile, 2018(5): 11-14(in Chinese).
- [20] Goward D. GPS to get terrestrial backup system[EB/OJ]. [2018-12-05]. <https://www.gpsworld.com/gps-to-get-terrestrial-backup-system/>.
- [21] Ziebold R, Dai Z, Noack T, et al. The on-board maritime PNT module-integrity monitoring aspects and first experimental results [C]// Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering. Swinouiscie, Polen, 2011: 557-568.
- [22] Gregory J, Swaszek P, Alberding J, et al. The feasibility of R-mode to meet resilient PNT requirements for E-navigation[C]// Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa, Florida: ION, 2014: 3076-3100.
- [23] 汤泽滢, 吴萌, 吴玮佳, 等. 美军“施里佛”系列太空作战演习解读[J]. 装备学院学报, 2017, 28(1): 54-60.
Tang Zeying, Wu Meng, Wu Weijia, et al. Analysis and comprehension on schriever wargames by USAF [J]. Journal of Equipment Academy, 2017, 28(1): 54-60(in Chinese).
- [24] 刘苗苗, 焦文海, 贾小林. 战时叙利亚地区定位结果分析[J]. 测绘科学与工程, 2018, 38(4): 19-25.
Liu Miaomiao, Jiao Wenhai, Jia Xiaolin. Analysis of GPS positioning in wartime syria[J]. Geomatics Science and Engineering, 2018, 38(4): 19-25 (in Chinese).
- [25] 葛悦涛, 薛连莉, 李婕敏. 美国陆军 PNT 能力发展趋势分析[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 12-18.
Ge Yuetao, Xue Lianli, Li Jiemin. Analysis of the development trends of US army PNT capability[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(2): 12-18(in Chinese).
- [26] Daniel Cebul. DoD jams GPS in western states for joint exercise [EB/OJ]. [2018-01-26]. <https://www.c4isrnet.com/special-reports/pnt/2018/01/26/dod-jams-gps-in-western-states-for-joint-exercise/>.
- [27] Steven V. Red Flag 18-1[EB/OJ]. [2018-02-21]. <http://aviationphotodigest.com/red-flag-18-1/>.
- [28] Asically D C. Carrier Strike Group 4 is Jamming GPS Across U. S. Southeast Coast[EB/OJ]. [2019-02-08]. <https://theaviationist.com/2019/02/08/basically-carrier-strike-group-4-is-jamming-gps-across-u-s-southeast-coast/>.