

智能化导航战防御样式研究

杨帆¹, 吴忠望¹, 王小海¹, 李明贵²

1. 航天工程大学, 北京 101416

2. 263780 部队, 三亚 572000

摘要 针对最有可能受到干扰的情况,研究了当卫星导航拒止下,提出无人机伪卫星组网导航替代防御样式,在导航信号受到电磁干扰下多点位导航功率智能增强防御样式,在卫星导航信号不稳定时自主组合导航防御样式,在卫星导航信号频段被攻击时在轨自主编程和导航信号重构防御样式,从而从多个角度全方位有效进行防御,保证导航信号正常播发,有效支持各作战活动顺利开展。

关键词 智能化;导航战;防御;作战样式

由于卫星导航落地信号微弱,极易被战场复杂电磁环境和同频信号干扰,甚至被欺骗,并且在经过电离层延迟、复杂环境下的多径效应以及各种噪声的影响后,落地信号往往产生了畸变,上述情况严重影响卫星导航信号的精确性、稳定性和可靠性,亟需研究抗干扰、抗欺骗的防御性智能化导航战抗干扰样式,以有效抵抗卫星导航可能受到的多种干扰攻击。

防御性导航战抗干扰样式主要是指采取被动性手段,有效地抵抗、化解相关破坏与干扰^[1]。在具体方式上有优化星座设计,提高整体弹性;通过电磁或激光加固技术提高导航卫星抗干扰能力,通过星间链路、自主时间同步等技术提高星座自主运行能力;对导航地面运控部分进行冗余配置;对终端导航提高抗干扰能力等。

针对卫星导航最有可能受到干扰的情况,本研究当卫星导航拒止下,提出无人机伪卫星组网导航替代防御样式;在导航信号受到电磁干扰时,提出多点位导航功率智能增强防御样式;在卫星导航信号不稳定时,提出自主组合导航防御样式;以及在卫星导航信号频段被攻击时,提出在轨自主编程和导航信号重构防御样式。

1 国内外研究现状

1.1 伪卫星技术

1.1.1 地基伪卫星

地基伪卫星通过在地面建立固定发射机,向用户发射与全球卫星导航系统(GNSS)类似的导航信号,这样无须进行硬件改装,用户可以使用GNSS

收稿日期:2023-09-26;修回日期:2023-12-05

作者简介:杨帆,副教授,研究方向为卫星导航,电子信箱:sarah0824@hotmail.com

引用格式:杨帆,吴忠望,王小海,等.智能化导航战防御样式研究[J].科技导报,2024,42(23):54-61;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01462

用户终端直接接收伪卫星信号,实现导航信号增强^[2],如图1所示。使用地基伪卫星,尤其是在城市等复杂环境下,可有效增加可见卫星数量,改善可见卫星几何分布,提高定位的可靠性,并提高服务的连续性和可用性。

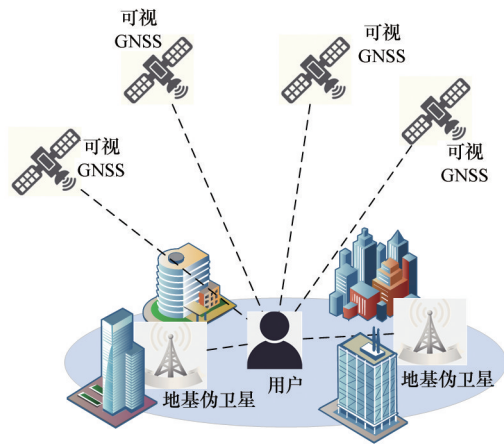


图1 伪卫星与GNSS组合定位示意

1978年,为了对全球定位系统(GPS)的技术原理进行验证,美国的研究人员在尤马军事基地搭建了世界上第一个GNSS地面伪卫星,该装置采用GPS信号发射机,向地面用户接收机发射GPS测试信号^[3]。1984年,Klein等^[4]首次提出了用伪卫星对导航信号进行增强,证明了伪卫星能够优化导航星座几何构型,从而提升GPS导航性能。20世纪90年代初,斯坦福电信公司建立了伪卫星测试系统,验证了利用伪卫星技术可有效解决远近效应问题^[5]。随着卫星导航技术的进步,伪卫星不断完善,成为增强GNSS的有效手段。

1.1.2 空基伪卫星

地基伪卫星所播发的导航信号容易被地面的障碍物遮挡,为了满足可用的覆盖范围,一般要设置较多数量的地基伪卫星。空基伪卫星就是将伪卫星搭载在空基平台上,例如无人机、气球等载体,可有效解决复杂环境下地基伪卫星信号被障碍物遮挡的问题,从而增加信号覆盖范围,使用较少数量的空基伪卫星就可以实现导航信号增强。并可以依据应用需求动态调整航迹,从而实现对指定区域的动态覆盖。此外,由于无人机(UAV)与用户的

距离通常远大于地基伪卫星与用户的距离,且用户对UAV伪卫星观测仰角通常较高,有效降低了远近效应和多径效应对用户的影响。

空基伪卫星系统^[6]包括UAV伪卫星、主控站和用户,如图2所示。2001年,美国国防部DARPA提出了全球定位实验(GPX)计划^[7],利用地面设备或空中无人机进行加密GPS信号的功率放大转发,在目标区域上空构建了一个伪卫星GPS星座。利用4架“全球鹰”无人机即可覆盖300 km²的区域,并且在伊拉克战争中美军就使用并检验了该方法。利用4架无人机构成伪卫星星座,实现了导航信号的放大转发,增强了信号的抗干扰能力,保障了地面部队和导弹部队的导航服务。Kim等^[8]提出了使用无人机伪卫星进行目标区域环境定位方法。文献[7]提出了结合无人机和地基伪卫星组网建立虚拟GPS星座,由地基伪卫星为无人机进行定位。

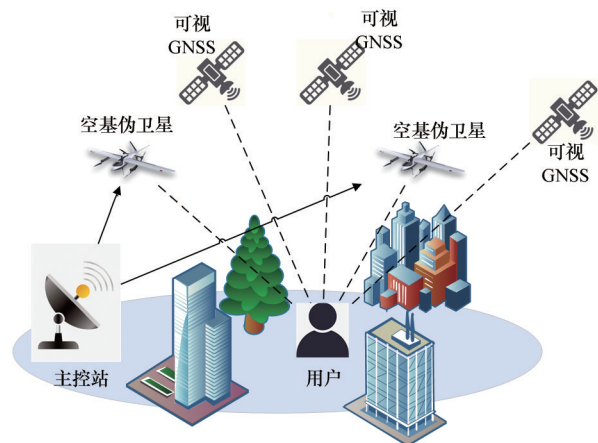


图2 空基伪卫星系统示意

当GNSS系统可用时,UAV伪卫星可与GNSS卫星组合定位,实现导航增强;当GNSS系统不可用时,充足数量的UAV也可独立定位,成为GNSS拒止条件下的导航替代方案。

1.2 导航功率增强

导航功率增强是提高导航终端抗干扰能力的有效手段。尤其是在复杂电磁环境下,卫星导航信号在到达地面导航终端时已很微弱,导航终端往往无法接收有效的卫星导航信号,通过对导航功率增强,导航终端就可以成功捕获信号。为了进行导航

功率增强, 需要根据需求控制增强功率的导航卫星数量、导航卫星的构型、导航卫星的截止角, 从而有效地控制导航卫星的覆盖范围及功率大小。点波束功率增强方案^[9]可以保证半径 300 km 范围功率增强 25 dB, 星上信号功率可调策略^[10]可以保证最大功率增强达 7 dB。

吕志成等^[11]提出了基于最优几何精度因子(GDOP 值)准则的卫星功率增强策略, 在可视卫星的范围内计算所有组合的 GDOP 值, 以最小 GDOP 值对应的组合作为功率增强的选星方案; 提出了基于最少切换准则的卫星功率增强策略, 在可视卫星的范围内, 依据最优 GDOP 值准则确定 4 颗卫星作为播发功率增强信号的卫星组合。随着历元增加, 若当前选择的 4 颗星依然可视, 则保持选星方案不变, 否则重新选择当前可视卫星中 GDOP 值最小的 4 颗卫星组合。该方案在保证导航卫星信号尽可能好的前提下, 避免了卫星的频繁切换, 降低了系统的控制复杂度, 从而提高可靠性。

郝雨时等^[12]在“基于最优 GDOP 值准则的卫星功率增强策略”的基础上, 又考虑了卫星截止高度角及功率增强中心区域位置, 动态调整选星数量, 既保证了功率增强服务性能, 又控制了功率增强的复杂性。

上述导航功率增强策略均是针对单个区域的功率增强而进行选星规划, 当多个点位同时进行功率增强时, 就需要考虑更多的因素和组合方案, 从而保证多个点位的功率大小均满足要求, 且增强时间、增强区域的大小也满足要求。

1.3 组合导航技术

组合导航系统可以集成融合多种导航系统的导航参数, 提供更精确、稳定的导航引导服务。现有的组合导航系统研究有很多, 例如, 将捷联惯导(SINS)和多普勒计程仪(DVL)进行组合用于水下导航^[13], 将视觉导航和惯性导航进行组合用于为传感器平台提供更精确的运动跟踪信息^[14], 将 SINS、GNSS 和雷达高度表(RA)^[15]进行导航信息融合, 为导弹提供鲁棒性更高、更为可靠的定位信息等。大多数组合导航方式都会采用惯性导航, 因为其能够

提供位置、速度、方位和姿态等丰富的导航参数, 并且是一种无源的导航系统, 不容易被干扰。由于 GNSS 系统成本低、定位准确、信号全球全天候覆盖, 被广泛应用到各个领域, GNSS 和惯性导航组合的导航方式被更为广泛地研究^[15-17]。然而随着不同应用场景下对导航精度和可靠性提出的更高要求, 需要结合人工智能技术, 对导航中发生的难以预见的因素进行自主的判定, 对组合导航系统进行智能化的管理, 从而提高导航精度及可靠性。

1.4 信号重构算法

信号重构是一种数字信号处理技术, 可以将观测得到的信号数据进行恢复、分离、重构出原本的信号, 并且在各个领域都得到应用, 包括通信、雷达、图像处理、天文学等。在通信信号处理中, 刘高辉等^[18]提出了一种基于信号稀疏表示的干扰抑制与通信信号重构方法, 可以将混有噪声信号的通信信号通过正交匹配追踪算法进行分离, 重构出完整的通信信号。在雷达信号处理中, 刘方正等^[19]提出一种基于变分模态分解和压缩感知(VMD-CS)的雷达信号重构方法, 可以将丢失高达 30% 的雷达信号进行重构, 得到完整的雷达信号。在导航信号处理中, 卢丹等^[20]提出一种基于信号重构的单天线欺骗干扰抑制方法, 通过参数估计方法估计出欺骗信号的载波频率和码相位, 构建欺骗信号的子空间正交投影矩阵, 从而抑制干扰, 实验证明可有效抑制欺骗干扰。

美国在 2023 年发射下一代导航技术卫星-3(NTS-3)新技术实验卫星^[21], 该卫星将用来测试其搭载的数字信号发生器, 允许卫星进行在轨重新编程, 生成新的波形的导航信号, 且有选择地对生成的导航信号进行播发, 从而避免导航干扰的影响。新的导航信号又添加了加密签名, 用户段在接收信号的同时进行解密, 从而又避免了导航欺骗的影响。但用户段在解密接收信号的同时, 由于信号经过噪声、远距离传输、电磁干扰、多径效应等各种因素已经发生了畸变, 无法保证重构出原始信号。需要结合人工智能技术, 对用户段接收到的新的导航信号进行自主重构。

2 智能化导航战防御样式

2.1 无人机伪卫星组网导航替代防御样式

在卫星导航拒止条件下,GNSS信号已不可获得,无法利用GNSS信号进行正常导航引导,需要寻找GNSS的可替代方案。地基伪卫星方案虽然可以增加可见卫星数量,改善可见卫星几何分布,以及提高定位可靠性,但覆盖范围十分有限,需要布设大量地基设备,且不具备灵活性,无法灵活改变信号增强区域。空基伪卫星方案可有效扩大信号覆盖范围,但存在UAV位置估计不准导致用户定位精度降低的问题。

针对上述问题,提出船载/车载基站和无人机机载伪卫星组网相结合的方式,既能够增加信号覆盖范围,又保证信号覆盖范围可灵活移动。在海上环境下,采用船载基站和无人机机载伪卫星组网相结合的方式,如图3所示;在陆地环境下,采用车载基站和无人机机载伪卫星组网相结合的方式,如图4所示。无人机作为伪卫星进行组网,无人机的位置就作为参考点来对目标进行定位,但在GNSS拒止环境下,无人机无法依赖GNSS获取自身位置信息,需要结合GNSS、惯导和地基伪卫星系统共同完成无人机定位。当无法接收GNSS信号时,可依赖惯导和地基伪卫星进行定位;当地基伪卫星信号也不可获得时,依赖惯导进行定位;当长时间依赖惯导定位时,无人机需要飞离无GNSS和地基伪卫星信号的环境,重新定位后再飞回作战区域重新组网。无人机动态改变自身位置同时也能降低长期在固定位置被干扰的风险。无人机伪卫星组网导航替代防御样式可有效增强在卫星导航拒止条件下导航替代防御样式的灵活性,是对弹性定位、导航、授时(PNT)的有力支撑方案。

集群无人机具备协同定位、协作感知和自主控制能力。将无人机协同编队技术应用于空基伪卫星,可实现空基伪卫星的自主协同编队飞行,构成导航自组织网络,通过节点间相互协同定位;可有效提升节点自身的定位和授时精度,从而有效提高用户定位精度和可靠性;可通过快速调整节点数量和编队构型满足动态变化的服务需求。

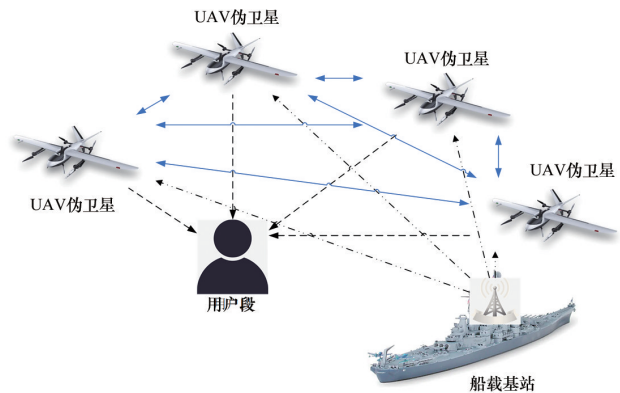


图3 船载基站和无人机机载伪卫星组网相结合

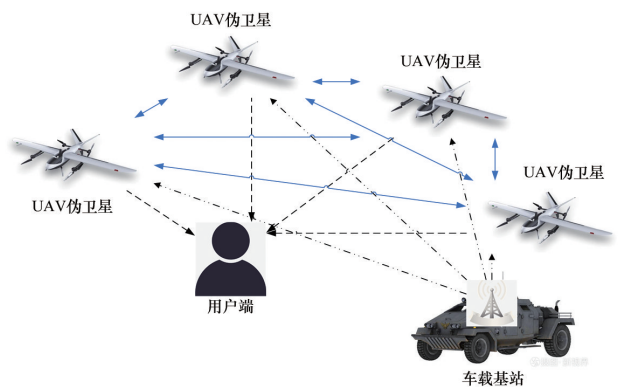


图4 车载基站和无人机机载伪卫星组网相结合

2.2 多点位导航功率智能增强防御样式

现有的导航功率增强防御样式都是针对单个区域进行功率增强,且要求增强的区域范围越大越好,增强的功率越高越好。而战时进行功率增强时,往往有多个点位都要进行功率增强,并且为了避免被探测到增强的区域,需要控制增强的范围及功率的大小。针对多点位同时进行导航功率增强时,就需要考虑更多的因素和组合方案,从而保证多个点位的功率大小、增强时间、增强区域的范围也满足要求。本研究提出多点位导航功率智能增强防御样式(图5),综合考虑可视卫星数量、增强区域大小、增强区域数量、增强功率大小、卫星截止高度角、功率增强中心区域位置、增强时间、GDOP值、增强卫星切换次数、增强卫星数量多个因素,动态生成多点位导航功率智能增强方案。

增加功率增强卫星数量虽然能改善定位精度,

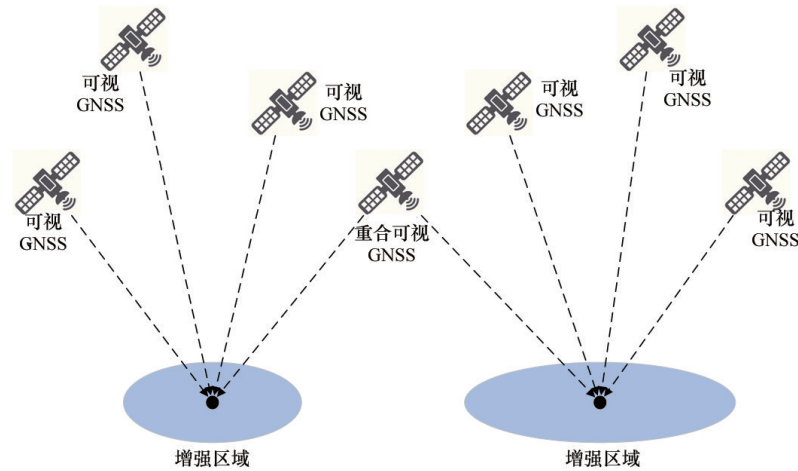


图5 多点位导航功率智能增强防御样式

但不会明显提高导航终端的抗干扰能力,增加切换次数也会对卫星稳定性造成影响。所以本研究对每个区域选择4颗可视卫星进行增强,保证最基本的功率增强要求。

扩大功率增强的范围,容易被侦测到作战区域,所以根据Kim^[8]研究结果,功率增强25 dB的覆盖半径为300 km,选择300 km作为满足功率增强的最小范围,据此提出如图6的多点位导航功率智能增强方案。当多点位同时进行导航功率增强时,不同区域增强的范围大小不同,导致增强功率不同。针对

每个中心区域,根据其增强范围大小,判断其增强区域的环境,平坦地形、山区、城市区域的卫星截止高度角选择不同,根据增强区域环境类型估计截止高度角,从而搜索出每个区域的可视卫星。对于搜索得到的可视卫星,地面站指控端可通过直接发送或通过星间链路间接将功率增强指令发送给这些可视卫星,从而实施功率增强。若有相邻增强区域,则有部分重合可视卫星,这部分卫星可作为重点增强卫星,在无重合可视卫星中选择GDOP值最小组合,也进行功率增强,从而保证信号质量。

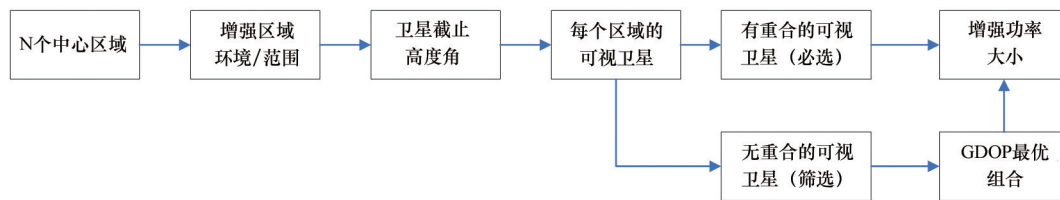


图6 多点位导航功率智能增强方案

2.3 自主组合导航防御样式

惯性导航与卫星导航组合使用,一方面,卫星导航系统可用于发现并标校惯导的系统误差,提供导航精度;另一方面,惯导系统又可以弥补卫星导航信号受干扰时信号不稳定或无法接收的情况下继续提供导航服务的能力。

传统的GNSS和INS组合导航方式如图7所示,GNSS和INS通过卡尔曼滤波处理传感器测量值,估计误差状态,再用所估计的误差状态来修正INS的

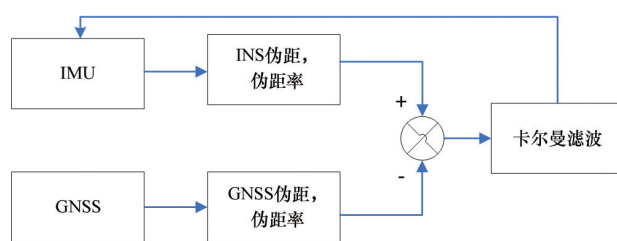


图7 传统组合导航模式

惯性误差,从而给出更加准确、稳定的载体高精度定位信息。在预测阶段,卡尔曼滤波器根据最后一个时间点的位置和速度信息预测当前的位置信息;在更新阶段,卡尔曼滤波器通过对目标位置的当前观测修正位置预测,从而更新目标的位置。

为了有效抑制导航中所发生的故障,以及各种不可预见的因素,可结合人工智能技术对传统的以卡尔曼滤波器为主的组合导航系统进行改进,如图8所示。一般惯导系统中会同时配置有惯导单元和里程计^[22],例如,汽车^[23]、移动机器人^[24]、无人平台等,其中里程计可用来计算移动距离,为了提高里程计的准确度,可以使用模糊神经网络对惯性单元的导航参数进行接收并生成里程计速度修正值,可提高GNSS失效时定位的精度。使用神经网络预测GNSS失锁时的位置误差和速度误差,通过卡尔曼滤波器处理测量值,并对惯导系统进行校正,结合考虑更多时刻的历史数据,保证了估计的准确性和稳定性,有效避免因为仅考虑前一时刻数据,而各种故障导致数据跳变引起的不稳定问题。

2.4 在轨自主编程和导航信号重构防御样式

针对空间段卫星导航信号被干扰以及用户段接收到的卫星导航信号发生畸变的问题,本研究提出在轨自主编程和导航信号重构防御样式,如图9

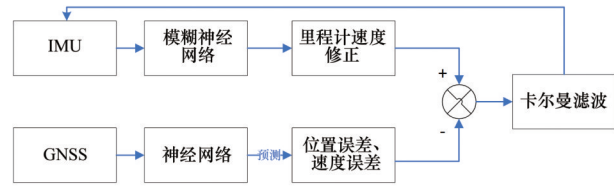


图8 自主组合导航模式

所示。在空间段卫星导航信号被干扰时,可通过导航信号在轨自主编程,一方面根据干扰信号的时频特性自主改变卫星导航信号的时频特性,卫星导航信号可从预制的调制信号库中自主选择一种进行播发,确保分别从时域或频域避开干扰信号,从而避免被干扰;另一方面,为了保证用户段能够正确识别卫星导航信号时频特性自主改变后的信号,地面接收机应根据调制信号库的所有可能信号的调制方式进行解调。但用户段接收机接收到的卫星导航信号有可能因为噪声、远距离传输、电磁干扰、多径效应等因素发生畸变,可基于长短期记忆模型(LSTM)的零化滤波器进行导航信号自主重构。根据畸变信号的未知波形结构和理想波形之间的关系,对播发的导航信号进行重构,从而恢复原始播发信号,保证导航信号质量和稳定性。结合空间段和用户段共同进行防御,可有效提高GNSS系统的抗干扰能力。

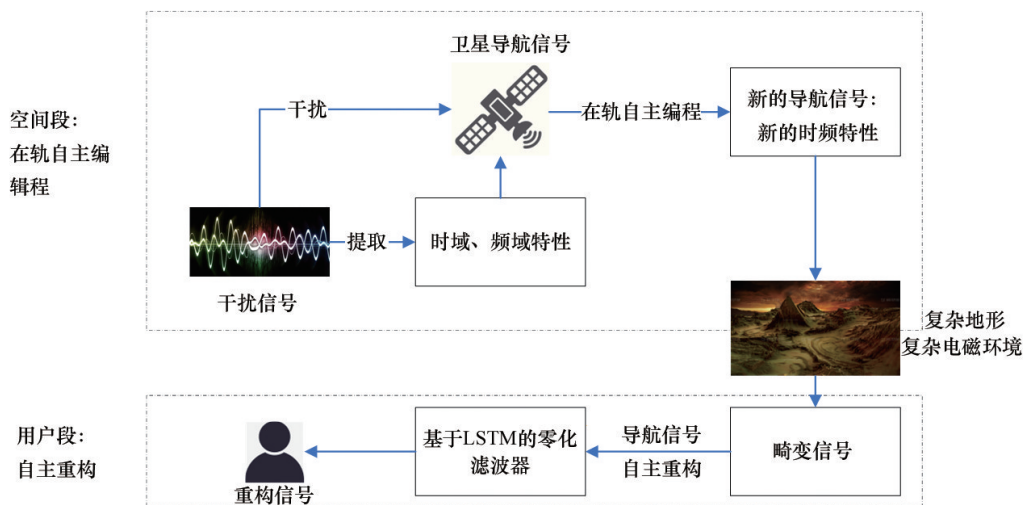


图9 在轨自主编程和导航信号自主重构模式

3 结论

为有效应对复杂电磁环境的影响和强敌威胁,需要综合考虑卫星导航系统复杂、落地信号弱、信号容易受到干扰等问题,整体提高并完善卫星导航系统的抗干扰、抗摧毁能力。除了本研究所讨论的几种智能化导航战防御样式,还需要探索更多更丰富的手段全面增强卫星导航系统的防御能力。一是重点加强信号体制优化、功率自适应分配等技术运用,拓展加强地基、空基等多平台区域增强手段,提高卫星导航系统的弹性和灵活性;二是优化地面运控系统布局,完善星地传输链路技术性能,提升地面段抗干扰抗物理摧毁和信息防护水平;三是综合运用多源融合导航,除了惯导,充分挖掘卫星导航和天文导航、地磁导航、视觉导航、地形匹配导航等多种导航方式的融合方式,综合提升卫星导航的抗压制、反欺骗能力,保证导航稳定持续精确的服务能力。

参考文献 (References)

- [1] 魏蒸, 李景伟, 王春雷, 等. 美军导航战运用浅析及思考[J]. 广东通信技术, 2023, 43(1): 63-68.
- [2] Cobb H S. GPS Pseudolites: Theory, design, and applications[D]. Stanford: Stanford University, 1997.
- [3] Harrington R L, Dolloff J T. The inverted range: GPS user test facility[C]//Proceedings of IEEE PLANS'76. San Diego, California, USA: IEEE, 1976: 204-211.
- [4] Klein D, Parkinson B W. The use of pseudo-satellites for improving GPS performance[J]. Navigation, 1984, 31(4): 303-315.
- [5] Elrod B, Barltrop K, Van Dierendonck A J. Testing of GPS augmented with pseudolites for precise approach applications[C]//Proceedings of the ION GPS 94. Salt Lake City, USA: Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1994:1269-1278.
- [6] Kim D, Park B, Lee S, et al. Design of efficient navigation message format for UAV pseudolite navigation system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1342-1355.
- [7] 美军计划研制能压制敌方干扰的虚势GPS[J]. 电子对抗技术, 2001, 16(5): 23.
- [8] Kim D H, Lee K, Park M Y, et al. UAV-based localization scheme for battlefield environments[C]//Proceedings of IEEE MILCOM 2013. Piscataway: IEEE Press, 2013: 562-567.
- [9] 孙进, 初海彬, 董海青, 等. 导航卫星系统功率增强技术与覆盖范围研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(S1): 80-84.
- [10] 林悦, 许昭霞, 满小媛. 美国导航卫星功率增强技术研究[C]//第十二届中国卫星导航年会, 北京: 中国北京卫星导航中心, 2021:72-75.
- [11] 吕志成, 刘增军, 王飞雪. 卫星导航系统功率增强对区域定位服务性能的影响分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 55-61.
- [12] 郝雨时, 孙剑伟, 马冬青. 北斗卫星导航系统功率增强选星策略设计与性能分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(2): 41-47.
- [13] 卢道华, 宋世磊, 王佳, 等. SINS/DVL水下组合导航技术发展综述[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(7): 1159-1170.
- [14] 吴建峰, 郭杭, 熊剑. 视觉惯性组合导航系统发展综述[C]//中国导航定位协会年会. 武汉: 中国卫星导航定位协会, 2020: 256-259.
- [15] 李杰, 梁玉琴, 李晟雯, 等. 一种基于联邦滤波的SINS/GNSS/RA 弹载多源组合导航算法[J]. 上海航天(中英文), 2023, 40(2): 106-111.
- [16] 袁林, 吴长水. 低精度IMU与GPS组合导航系统研究[J/OL]. 机械科学与技术:1-7 [2023-12-05]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230151>.
- [17] 王青江, 付迪. GNSS/INS组合导航算法设计及仿真系统实现[J]. 长江信息通信, 2023, 36(3): 35-37.
- [18] 刘高辉, 周熊. 复杂电磁环境下基于信号稀疏表示的干扰抑制与通信信号重构方法[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(11): 149-154.
- [19] 刘方正, 韩振中, 曾瑞琪. 基于变分模态分解和压缩感知的弱观测条件下雷达信号重构方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(6): 1644-1652.
- [20] 卢丹, 白天霖. 利用信号重构的全球导航卫星系统欺骗干扰抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(5): 1268-1273.
- [21] 张京男, 陈建光. 美国新一代实验性导航技术卫星发展研究[C]//第十三届中国卫星导航年会. 北京: 中国航天系统科学与工程研究院, 2022: 62-66.
- [22] 李小燕. 基于航位推算的掘进装备惯导里程计组合导航方法[J]. 煤矿机械, 2023, 44(11): 11-15.

[23] 兰春云, 缪玲娟, 沈军. 陆用捷联惯导系统中里程计刻度因子的在线辨识[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(2): 198-201.

[24] 刘辉, 张雪波, 李如意, 等. 双目视觉辅助的激光惯导SLAM算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1787-1800.

Research on defense style of intelligent navigation warfare

YANG Fan¹, WU Zhongwang¹, WANG Xiaohai¹, LI Minggui²

1. Space Engineering University, Beijing 101416, China

2. Unit 263780, Sanya 572000, China

Abstract Navigation warfare has become one of the new electronic combat styles, and it effectively supports joint operations. However, the satellite navigation landing signal is weak and highly vulnerable to interference, which affects various command chains of joint operations and has a devastating impact on the war. This paper proposes an alternative defense style for unmanned aerial vehicle (UAV) pseudo satellite network navigation when satellite navigation is rejected. Then a multi-point navigation power intelligent enhanced defense style is presented when navigation signals are subject to electromagnetic interference. Next, an autonomous integrated navigation defense style is put forward when satellite navigation signals are unstable. Finally, this paper proposes in-orbit autonomous programming and navigation signal reconstruction defense styles when the satellite navigation signal frequency band is attacked. Thus, effective defense can be carried out from multiple perspectives, ensuring the normal broadcasting of navigation signals, and effectively supporting the smooth progress of various combat activities.

Keywords intelligence; navigation warfare; defense style; combat style ●



(责任编辑 赵庆圆)