

无人船舶自主导航系统中的电子抗干扰策略

0 引言

无人船舶自主导航系统是实现船舶自动化运行关键。逐步复杂的电磁环境对系统形成严峻挑战,电子干扰已成为掣肘无人船舶安全高效运行的瓶颈。在此背景下,全面探讨抗干扰策略,对提高自主导航系统可靠性、促进该行业健康发展意义重大。

1 无人船舶自主导航系统受电子干扰的影响因素剖析

1.1 内部因素

无人船舶自主导航系统面临的内部电磁干扰,大多是由大功率设备引起,如电力推进系统中的电机和变频器等。运行中的这些设备会产生较强的电磁辐射,其中涉及传导干扰和辐射干扰两种类型。传导干扰借助供电线路、信号线等有线渠道耦合至导航关键设备,如全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、接收机、雷达等,可引起设备接收信号失真、定位精度下降等问题。而辐射干扰则凭借无线电磁场直接耦合到导航天线或设备内部电路,妨碍其正常工作进程。由于无人船舶内部空间存在局限性,不同功能的设备布局紧凑,且缺乏恰当的电磁兼容性设计,进一步加剧了内部干扰风险。

1.2 外部因素

无人船舶的自主航行任务通常在港口、狭窄航道等复杂海域开展,这些区域电磁环境恶劣,多种外部干扰源对导航系统构成严重威胁。如:其他船舶搭载的导航雷达、通信设备等会产生强电磁信号,其工作频段可能与无人船导航设备频率重叠或相邻,形成同频/邻频干扰;岸基通信基站、港口起重机、工业设备等辐射源对船载接收机形成电磁干扰,降低导航信号质量;在恶劣天气条件下,雷电放电产生的强电磁脉冲影响甚至损毁导航设备;太阳活动引发的电离层异常扰动导致卫星导航电文接收出错,降低定位精度。

2 无人船舶自主导航系统电子抗干扰策略实施

2.1 多源数据融合与智能滤波

自主导航系统须综合采用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、激光雷达、惯性导航等多源异构传感器,冗余配置可提升系统可用性至 99.99%。通过加权平均、卡尔曼滤波等数据融合算法,动态调整各传感器权重,显著提升综合定位精度。融合后定位误差率低于 1%,较单一传感器提升 5 倍以上。同时,引入深度学习技术构建干扰特征模型库,通过卷积神经网络等算法对导航数据进行智能分析,干扰信号检出率可达 95%以上,为自适应

滤波提供可靠依据。

2.2 动态抗干扰控制与实时补偿

无人船舶自主导航系统需建立自适应控制回路,通过扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)对系统状态进行实时估计,补偿控制器参数实现干扰抑制。相较 PID 控制,自抗扰控制器可将轨迹偏差降低 50%以上。在卫星导航方面,采用 7 单元以上抗干扰阵列天线,配合波束赋形、空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)等技术,对干扰信号进行空域滤波。实测表明,在强干扰环境下可提供 30 dB 以上抗干扰增益,有效保障关键导航数据质量。

3 无人船舶自主导航系统电子抗干扰预防策略部署

3.1 常态化电磁环境监测与校准

无人船舶须配备频率覆盖 9 kHz~18 GHz 的便携式电磁辐射测试仪,对船载电磁环境进行实时监测,测量灵敏度优于 1 μ V/m。建立完整的电磁干扰源清单与空间分布图,实现超标干扰溯源及动态管控。定期开展导航设备性能校准,动态调整接收机中频带宽至 30 kHz 以下,可有效抑制带外干扰。采用频率分集技术,在 L1、L2 等多频点同时接收卫星导航信号,通过交叉检验识别受干扰频点,保障关键导航数据完整性。对于连续 2 个校准周期内灵敏度劣化超过 3 dB 的设备,需及时更换以满足长期抗干扰需求。

3.2 智能运维与风险预警体系

自主导航系统须构建基于物联网技术的健康监测平台,采集惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、卫星导航接收机等关键设备运行参数,实现全船电磁态势感知。当导航信号强度下降 8 dB 以上或误码率超过 10^{-5} 时,及时预警干扰风险。平台须具备干扰源识别、路径分析等智能算法,干扰定位精度达到 0.5 m,为故障诊断提供数据支撑。同时,充分利用北斗短报文、铱星等卫星通信链路,构建船岸协同防护机制,岸基控制中心可远程配置导航设备工作模式,并根据受干扰状态灵活调整抗干扰策略,最大限度保障自主导航系统可靠性。

4 结束语

电子抗干扰能力已成为衡量无人船舶自主导航系统成熟度的重要指标。随着无人航行的环境日益复杂,亟需行业、企业、科研机构协同攻关,加快构建基于实际应用场景的多层级抗干扰防护体系。通过前瞻性顶层设计、创新性技术手段、常态化监测预警等举措,不断提升自主导航系统全域抗干扰能力,为我国无人船舶产业高质量发展保驾护航。

刘利

(舟山技师学院 浙江舟山 360011)