

# 无人机卫星导航系统的电磁干扰态势评估方法\*

张庆龙<sup>1,2</sup>, 王玉明<sup>1</sup>, 程二威<sup>1</sup>, 陈亚洲<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应国防重点实验室, 河北 石家庄 050003;

2. 海军航空大学, 山东 烟台 264000)

**摘要:**在战场复杂电磁环境下,卫星导航接收机很容易受到电磁干扰而出现不定位的现象,针对这一现象,提出了一种基于环境感知无人机卫星导航接收机的电磁干扰态势评估方法。以干扰信号的特征参数、导航接收机未受干扰时的接收状态作为预测的输入,以接收机跟踪环路失锁时的效应阈值作为观测目标值,建立了极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)的预测模型。在此基础上,给出了导航接收机电磁干扰态势的等级,提出了导航接收机在单源和双源电磁干扰下的态势评估方法。通过与高斯过程回归和支持向量机回归的预测方法进行比较,结果表明 XGBoost 方法具有更好的预测精度。依据该预测方法,综合利用技战术方案,有利于提高无人机在复杂电磁环境中的适应能力。

**关键词:**导航接收机;电磁干扰;评估方法;预测模型;技战术

**中图分类号:**TN97 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)06-109-08

## Evaluation method of electromagnetic interference situation for satellite navigation system of unmanned aerial vehicle

ZHANG Qinglong<sup>1,2</sup>, WANG Yuming<sup>1</sup>, CHENG Erwei<sup>1</sup>, CHEN Yazhou<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Naval Aeronautical University, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In the complex electromagnetic environment of the battlefield, satellite navigation receivers are susceptible to EMI (electromagnetic interference) and cannot be positioned. In response to this phenomenon, a method for evaluating the EMI situation of satellite navigation receivers based on unmanned aerial vehicle's environmental perception was proposed. When the navigation receiver was not interfered, the characteristic parameters of the EMI and the receiving state of the navigation receiver were used as the input of the prediction. When the receiver tracking loop was lost, the effect threshold was used as the observation target value to establish the XGBoost prediction model. On this basis, the rank of the EMI situation of the navigation receiver was given, and the situation assessment method of the navigation receiver under single-source or dual-source were proposed. Compared with the prediction methods of Gaussian processes for regression and support vector regression, the results show that the XGBoost method has the better prediction accuracy. According to this prediction method, the comprehensive utilization of the technology schemes and the tactical schemes is beneficial to improving the adaptability of unmanned aerial vehicles in complex electromagnetic environments.

**Keywords:** navigation receiver; electromagnetic interference; evaluation method; prediction model; technique and tactics

无人机的兴起是现代战争强调实时战场控制、情报收集以及适时准确攻击的产物<sup>[1]</sup>,但在现实复杂的战场电磁环境下,各种电磁信号交织,对于集成了各种用频装备的无人机产生了巨大影响,严重制约了无人机作战效能的发挥<sup>[2]</sup>。现有的小型无人机,其定位功能主要依靠卫星导航定位系统,当电磁干扰严重影响无人机的卫星导航定位系统时,会给无人机的飞行安全带来潜在的风险<sup>[3]</sup>,因此有必要开展导航接收机的电磁干扰态势评估方法研究,为改善无人机在复杂电磁环

境下的安全飞行条件提供依据。

文献[4]提出了一种导航接收机性能评估方法,以可见星的载噪比、伪距观测误差和所有可见星的几何精度因子作为评价指标体系,基于信息“熵”的理论算法,提出了一种虚拟的正、负理想评估方法,并筛选了几种实际场景进行了分析与评估比较,该方法适用于不同场景下卫星导航接收机定位性能优劣的评估比较。文献[5]研究了北斗 B1I 信号接收机在带限白噪声、匹配谱干扰和连续波三种干扰下的定位性能。但以上研究都

\* 收稿日期:2021-01-25

基金项目:国家部委基金资助项目(LJ20182A040327)

作者简介:张庆龙(1987—),男,河北衡水人,博士研究生,E-mail:695231878@qq.com;

陈亚洲(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:chen\_yazhou@sina.com

没有对同一场景下的电磁干扰态势做出评估。文献[6-7]从强电磁脉冲下导航接收机的耦合机理分析入手,基于不同射频前端元器件(低噪声放大器和限幅器)进行了仿真分析,得到了两种元器件在强电磁脉冲耦合干扰下的性能曲线。文献[8]基于上述工作,通过天线仿真软件和电路仿真软件的联合仿真,得到了接收机射频前端电路敏感器件的毁伤评价曲线。但实际上由于无人机在飞行过程所面临的电磁环境多为非强电磁场环境,且电磁干扰对导航接收机造成的影响一般为阻塞干扰<sup>[9]</sup>,而非毁伤效应,所以研究导航接收机的电磁干扰评估而非毁伤效应评估就显得十分有意义。本文通过开展导航接收机的电磁干扰效应试验,得到了不同卫星信号跟踪失锁时的效应阈值曲线,通过分析找到了影响效应阈值的敏感参数,然后结合深度学习的方法,建立针对效应阈值的 XGBoost 预测模型。根据试验过程中导航接收机的效应现象,给出了导航接收机的电磁干扰态势等级,基于此,提出了一种无人机卫星导航接收机电磁干扰态势评估方法。

### 1 导航接收机跟踪环路电磁干扰效应阈值的变化规律

无人机飞行过程中,在无外界明显电磁干扰的情况下,其导航接收机接收到的卫星信号质量受到地面卫星信号功率、多径干扰等因素的影响,其影响程度反映成可视化结果即卫星信号载噪比,因此在无外界电磁干扰的情况下,信号载噪比代表的是所有环境因素和接收机内部噪声共同作用下接收机实际对导航信号跟踪的能力。特别是当无人机在空中飞行时,由于多径干扰的作用减弱,接收机接收到的卫星信号载噪比较为稳定,所以可以用无电磁干扰时的卫星信号载噪比(即初始载噪比)表征导航信号的功率。文献[10]指出接收机内部跟踪环路中存在这样一个载噪比  $C/N_0$  门限值:凡是信号小于  $C/N_0$  这个门限值,环路将会丧失稳定跟踪该弱信号的能力,因此可以用  $C/N_0$  门限值作为接收机卫星跟踪失锁的判据。

由于接收机内部各个跟踪环路的处理流程类似,现只针对 8 号卫星进行研究,开展电磁干扰注入效应试验,得到了在不同初始载噪比下和不同干扰信号频率下跟踪环路失锁的效应阈值,如图 1 所示;初始载噪比一定时,不同干扰信号带宽下跟踪环路失锁的效应阈值如图 2 所示。

根据图 1 可以得出以下结论:

1) 干扰信号频率不同时,跟踪环路失锁的阈

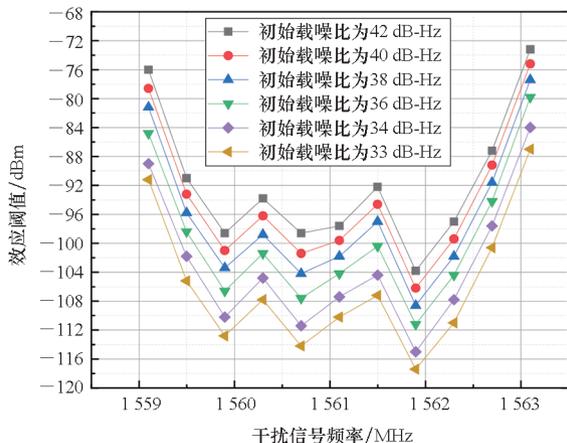


图 1 不同初始载噪比下的效应阈值  
Fig. 1 Effect threshold under different initial  $C/N_0$

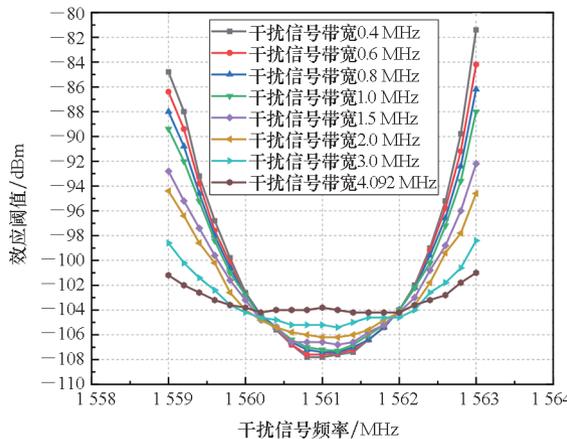


图 2 不同干扰信号带宽下的效应阈值  
Fig. 2 Effect threshold under different interference signal bandwidth

值不同,且两侧阈值明显大于带内阈值,两者之间为非线性变化。

2) 接收机内导航信号的初始载噪比越高,跟踪环路失锁的阈值就越高。实际试验过程中发现,当初始载噪比较高时,跟踪环路失锁阈值与初始载噪比之间基本呈线性关系,但当初始载噪比临近载噪比门限时,此时两者之间不再是线性关系。

根据图 2 可知,当干扰信号中心频率一致时,不同干扰信号带宽下,跟踪环路失锁的阈值也不一致,两者之间为非线性变化。对比图 1 和图 2 可以看出,在窄带和宽带电磁干扰下,跟踪环路失锁的阈值曲线相对于单频电磁干扰下的阈值曲线更为平滑,这是由于导航信号对于连续波干扰具有易感性<sup>[11]</sup>。

综上所述,引起导航接收机跟踪环路失锁的因素包含导航信号的初始载噪比、干扰信号频率以及干扰信号带宽,由于这三种因素与环路跟踪失锁阈值之间的关系都为非线性,采用传统的确定性分析方法难以展开非线性的预测建模,且通

过试验测量所有单源电磁干扰下环路跟踪失锁的效应阈值工作量巨大,不易实现,所以开展机器学习的办法将是可行的。首先通过开展电磁效应试验,构建原始试验数据样本,然后利用原始数据进行机器学习方法的训练建模,最后通过优化模型可以实现对导航接收机在不同电磁敏感参数下(包括干扰信号频率和干扰信号带宽)和不同初始载噪比下跟踪环路失锁效应阈值的预测,从而减少通过大量试验确定失锁效应阈值的工作量。

## 2 导航接收机跟踪环路失锁阈值的预测建模

### 2.1 XGBoost 回归预测方法

XGBoost 算法是近年来新兴起的一种预测算法,被广泛应用于工业故障检测、银行业、经济领域和医学领域等,其预测效果质量高。XGBoost 算法是基于梯度决策树 (gradient boost decision tree, GBDT) 框架上提出的<sup>[12]</sup>,其不仅在计算速度上得到了提升,并且由于该算法具有二阶连续可导的目标函数,能够提高算法的泛化能力<sup>[13]</sup>,还通过对目标函数引入正则项,进而有效避免过拟合现象的产生<sup>[14]</sup>。

包含有  $n$  条  $m$  维的数据集可以表示为:

$$D = \{(x_i, y_i)\} (x_i \in \mathbf{R}^m, y_i \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

那么模型可以表示为:

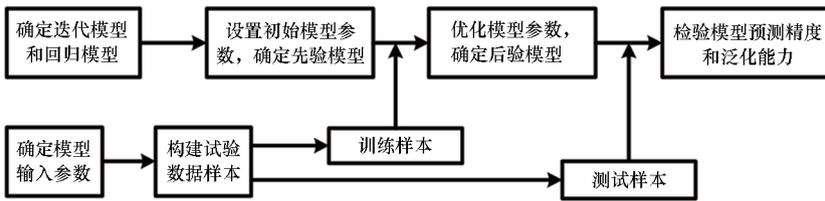


图3 失锁效应阈值的模型训练流程

Fig.3 Model training process of the loss of lock effect threshold

根据图3所示,基于XGBoost回归算法的导航接收机跟踪环路失锁效应阈值的预测方法包括:

1) 确定模型输入参数及构建试验数据样本。通过第1节中电磁干扰效应试验结果分析得知,导航信号的初始载噪比  $C/N_0$ 、干扰信号频率  $f_j$  和干扰信号带宽  $B_j$  是影响跟踪环路失锁效应阈值的敏感参数,因此将这3个参数设定为模型输入参数。由于接收机内部所有跟踪环路的处理流程基本相似,因此只选取8号卫星作为试验对象,以上述3个参量作为试验时的可调变量(其中窄带和宽带干扰信号由噪声调制而成),开展电磁干扰效应试验,得到导航接收机跟踪环路失锁的效应阈值,最终构建数据样本量为750组,将其中的700

$$\hat{y}_i = \theta(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in F (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中,  $x_i$  为样本输入值,  $\hat{y}_i$  为样本的预测值,  $K$  为子模型总数,  $F$  为所有决策树的集合,  $f_k$  为第  $k$  棵决策树,其表达式如下

$$F = \{f(x) = \mathbf{w}_{q(x)}\} (q: \mathbf{R}^m \rightarrow \{1, 2, \dots, T\}, \mathbf{w} \in \mathbf{R}^T) \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{w}_{q(x)}$  为决策树叶子节点的权重向量,  $\mathbf{w}$  为叶子权重,  $q$  为树结构。

模型的目标函数可以表示为:

$$O = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (4)$$

其中:  $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  为损失函数项;  $\sum_{k=1}^K \Omega(f_k)$  为正则化项,  $y_i$  为样本的真实值,通过调整  $\Omega$  内部参数可以避免模型过拟合。

XGBoost 的思想是每次迭代运算将增加一棵树,目的是为了使得预测值不断接近真实值<sup>[15]</sup>,当大量的回归树建立好后,通过使用“贪心算法”搜索最优的回归树结构,使目标函数的值最小,此时的最优回归树结构即为最优的 XGBoost 模型。

### 2.2 训练建模的流程

根据 XGBoost 回归预测算法,导航接收机跟踪环路失锁效应阈值的训练流程如图3所示。

组作为训练样本,50组作为测试样本。

2) 确定迭代模型和回归模型,设置初始模型参数。选择基于上升树的计算迭代模型和线性回归的目标函数模型,并在此基础上设置初始模型参数,确定先验模型。

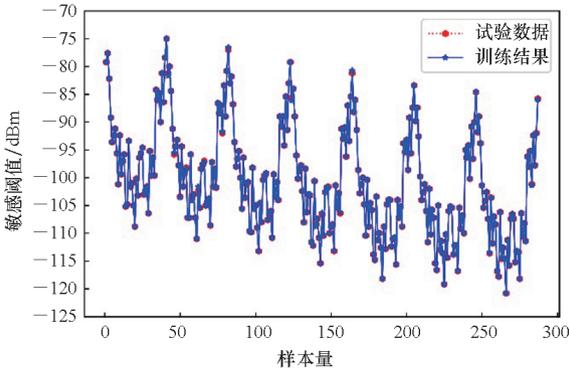
3) 模型训练。将训练样本中的3个参量作为模型输入,跟踪环路失锁的效应阈值作为模型输出,不断优化调整模型参数,并确定最优参数,得到后验模型。

4) 模型预测精度检验。利用测试样本中的3个参量作为后验模型的输入,可以预测得到模型的输出,并与测试样本中跟踪环路失锁的效应阈值进行对比分析,完成对模型预测精度和泛化能

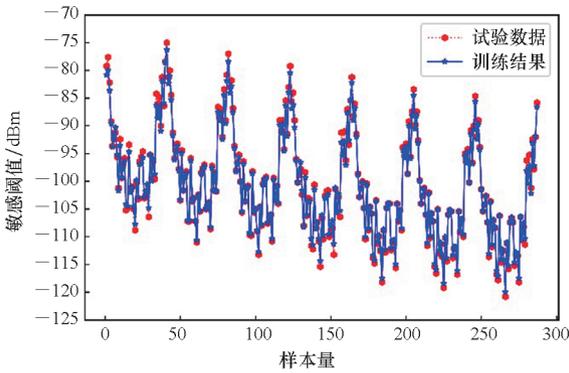
力的检验。

### 2.3 模型训练

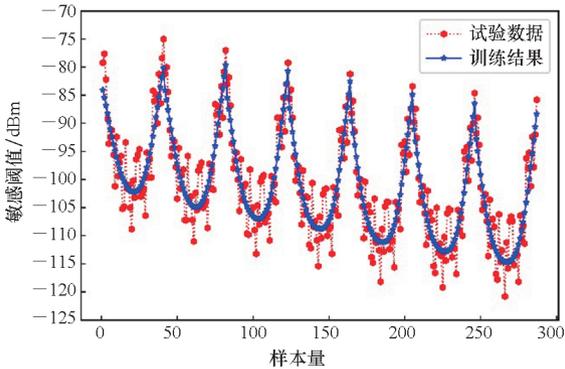
通过上述模型训练流程进行 XGBoost 模型训练,为了显示 XGBoost 模型训练结果的优越性,训练过程中对高斯过程回归 (Gaussian process regression, GPR) 模型和支持向量机回归 (support vector regression, SVR) 模型同步进行了训练,训练结果如图 4 所示,由于训练数据样本量较大,故只取前 290 组数据进行展示。图 5 所示为不同模型的训练误差。



(a) XGBoost 模型训练结果  
(a) XGBoost model training results



(b) GPR 模型训练结果  
(b) GPR model training results

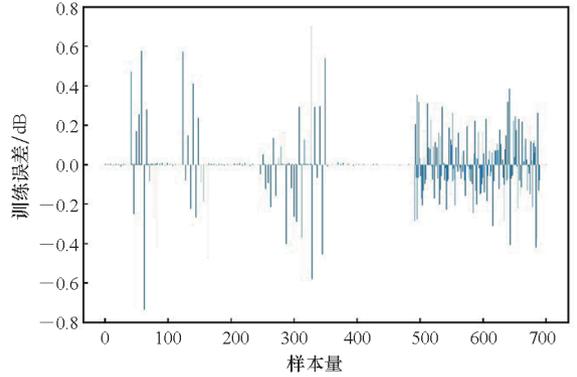


(c) SVR 模型训练结果  
(c) SVR model training results

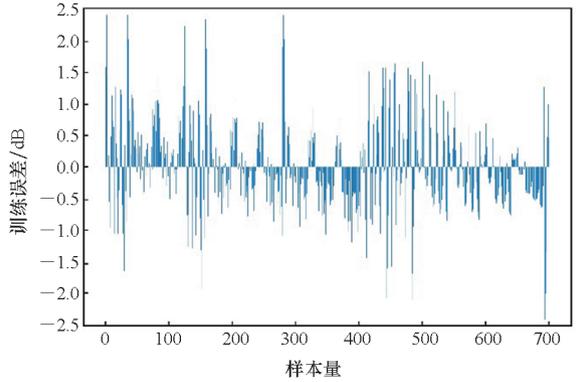
图 4 不同预测模型的训练结果

Fig. 4 Training results of different prediction models

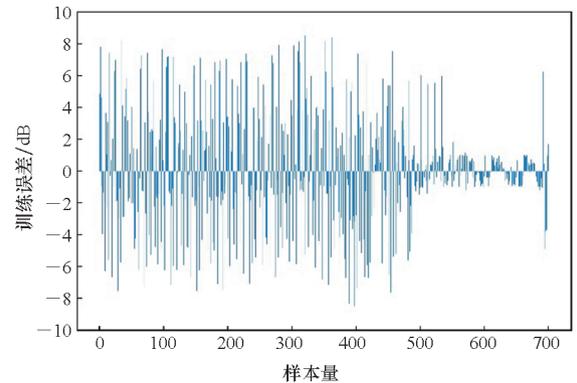
根据图 4 和图 5 可以看出,对于跟踪环路失锁效应阈值的训练结果,XGBoost 模型的训练精度高于 GPR 模型和 SVR 模型的训练精度,其中 SVR 模型虽然可以通过调整内部参数优化训练结果,但最优参数下的训练误差依旧很大,超过了国军标规定的 3 dB 允差<sup>[16]</sup>,并不满足实际需求,而 GPR 模型和 XGBoost 模型的训练误差在规定的允差范围内。



(a) XGBoost 模型训练误差  
(a) XGBoost model training error



(b) GPR 模型训练误差  
(b) GPR model training error



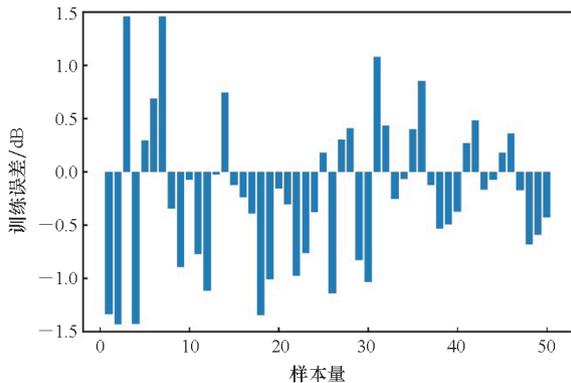
(c) SVR 模型训练误差  
(c) SVR model training error

图 5 不同预测模型的训练误差

Fig. 5 Training errors of different prediction models

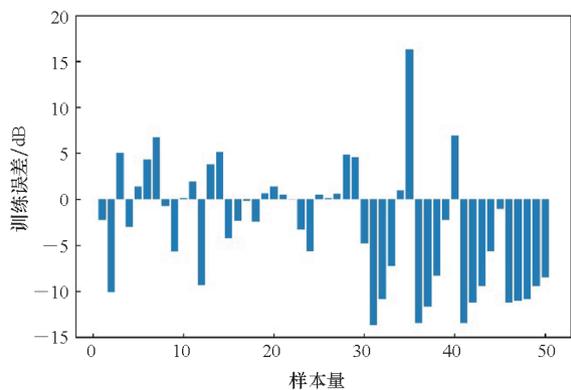
为了检验训练模型在预测方面的效果,利用

测试样本,对 GPR 模型和 XGBoost 模型的预测性能进行比较,结果如图 6 所示。



(a) XGBoost 模型预测误差

(a) XGBoost model prediction error



(b) GPR 模型预测误差

(b) GPR model prediction error

图 6 不同模型的预测结果

Fig. 6 Forecast results of different models

根据图 6 的预测结果可以看出,GPR 模型的预测误差较大,最大处超过了 15 dB;而 XGBoost 模型的预测误差较小,优于 GPR 模型的预测结果,满足国军标规定的 3 dB 允差。

虽然 GPR 模型通过内部调参,可以使得训练具有较好的效果,但在实际预测时,预测效果较差。这是由于导航接收机针对单频干扰具有易感性,在单频干扰下,导航接收机的电磁干扰阈值随频率变化剧烈,对于需要数据预处理的 GPR 模型来说,当某一个输入变量的变化幅度较大时,会增大其预测误差。相比于 GPR 模型,XGBoost 模型算法不需要数据的预处理,进行训练和预测时更加方便快捷,且能获得较好的预测结果。

模型预测结果的准确度受限于接收机对有用信号载噪比测定的精度以及无人机环境感知平台对干扰信号特征参数测定的准确度。

1) 在有用信号方面,由于该模型训练基于导航信号的初始载噪比,所以接收机载噪比测定的精确度以及稳定性越高,对于预测结果的准确性

也就越高。特别是当无人机在空中飞行时,由于受到周围环境影响较小,接收机各跟踪环路的载噪比较为稳定,通过模型预测无人机的当前跟踪环路失锁的效应阈值也就更加准确。但是,当无人机所处环境多径干扰严重时,接收机载噪比测定的准确性严重降低,预测结果的准确性也将会大大降低。

2) 感知平台对干扰信号频率以及功率测定的准确度越高,其用于模型预测结果的准确度也就越高。

### 3 无人机卫星导航系统的干扰态势评估方法

#### 3.1 无人机卫星导航系统在单源电磁干扰下的态势评估方法

根据导航接收机电磁干扰试验的效应现象,可以将导航接收机在电磁干扰下的定位状态定义为稳定状态、性能降级和定位丢失三种等级。其中,稳定状态表示为接收机内卫星信号的载噪比可能因电磁干扰而出现下降,但没有出现卫星跟踪丢失的现象;性能降级表示为接收机因受到电磁干扰影响,接收机内部跟踪环路开始出现失锁的现象,第一颗卫星跟踪丢失;定位丢失表示为接收机内部多个跟踪环路失锁,跟踪卫星数目不满足导航接收机最低定位要求,接收机定位失败。

通过前期导航接收机的电磁干扰效应试验得知,在窄带电磁干扰、宽带电磁干扰以及带外单频电磁干扰下,当干扰信号功率和频率一定时,接收机内所有卫星信号的载噪比衰减一致;而当干扰信号为带内单频电磁干扰时,由于导航信号对连续波干扰的易感性,所有卫星的载噪比衰减不一致,因此在单频干扰下低载噪比的卫星不一定是最先丢失的卫星,所以在对无人机导航接收机干扰态势评估方面应对每颗卫星跟踪丢失的干扰阈值进行评价,而不能单纯从卫星载噪比的大小入手。

无人机卫星导航系统在单源电磁干扰下的态势评估方法如下:

1) 无人机飞行过程中,导航接收机内卫星信号的载噪比短时间内变化较小,当导航接收机载噪比开始普遍下降时,且此时无人机环境感知平台监测到的干扰信号出现时,记录上一时刻卫星信号的载噪比为初始载噪比。

2) 根据每颗卫星的初始载噪比和环境感知平台监测到的干扰信号特征(频率和带宽),通过

XGBoost 预测模型可以得出每颗卫星信号在当前状态下跟踪失锁效应阈值,记为  $P_i$  (其中  $i$  为卫星信号)。

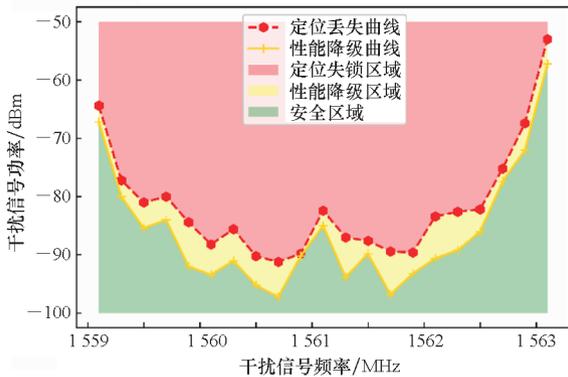
3) 利用环境感知平台测量得到的干扰信号功率  $P_j$ , 将  $P_j$  与每颗卫星的失锁阈值作差  $P_i$ , 得到每颗卫星的电磁干扰余量, 即

$$\Delta_i = P_i - P_j \quad (5)$$

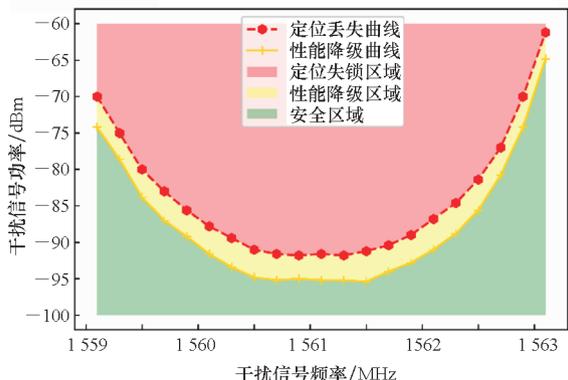
假设接收机观测到的有效卫星为 6 颗, 且最低定位卫星数目要求为 4 颗, 根据干扰余量的值得到以下排序:

$$\Delta_i^1 \geq \Delta_i^2 \geq \Delta_i^3 \geq \Delta_i^4 \geq \Delta_i^5 \geq \Delta_i^6 \quad (6)$$

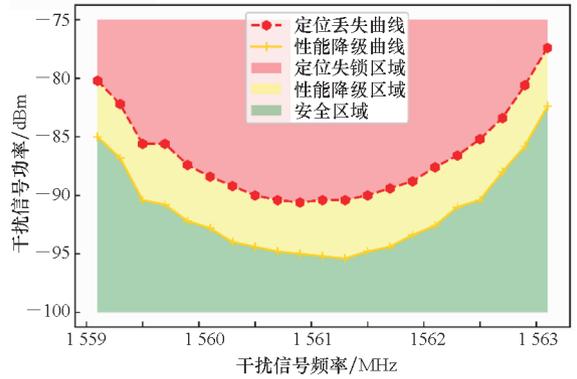
其中, 上标 1、2、3、4、5、6 为干扰余量由大到小的排序。当  $\Delta_i^6 = 0$  时, 电磁干扰信号功率为  $P_{sm}$ , 导航接收机的定位状态进入性能降级区域, 接收机内部开始出现卫星丢失的现象; 当  $\Delta_i^4 = 0$  时, 导航接收机内部有效卫星数已不满足最低定位要求, 接收机定位丢失, 此时电磁干扰信号功率为  $P_{lm}$ 。图 7 所示为不同单源电磁干扰下导航接收机的电磁干扰等级曲线, 其中接收机初始跟踪的卫星数目为 6 颗, 最低定位星数要求为 4 颗, 卫星跟踪失锁阈值由 XGBoost 模型预测得出。



(a) 单频干扰下的电磁干扰态势  
(a) EMI situation under single frequency interference



(b) 窄带干扰下的电磁干扰态势  
(b) EMI situation under narrowband interference



(c) 宽带干扰下的电磁干扰态势  
(c) EMI situation under broadband interference

图 7 不同电磁干扰下的干扰等级曲线

Fig. 7 Interference level curve under different electromagnetic interference

### 3.2 无人机卫星导航系统在双源电磁干扰下的态势评估方法

由于无人机在飞行过程中不可避免会遇到多源电磁干扰的情况, 因此开展卫星导航系统在多源电磁干扰下的态势评估方法将十分有意义。以带内双源电磁干扰为例, 前期通过数学建模的方式得到了导航接收机跟踪环路在带内双源电磁干扰下的效应模型, 如式(7)所示。

$$S = \frac{P_{i1}}{P_{i1}} + \frac{P_{i2}}{P_{i2}} = 1 \quad (7)$$

式中,  $S$  为压制系数。当  $S \geq 1$  时, 表示当前双源电磁干扰信号的功率组合会导致跟踪环路中的卫星跟踪丢失; 当  $S < 1$  时, 表示当前双源干扰信号的功率组合不会导致跟踪环路中的卫星跟踪丢失。为了验证模型的有效性, 后续设计并开展了针对多款导航接收机的双源电磁干扰效应试验, 最终利用试验数据验证了该模型的有效性。

本节将在这一模型的基础上, 开展无人机卫星导航系统在双源电磁干扰下的态势评估方法:

1) 无人机飞行过程中, 导航接收机内卫星信号的载噪比短时间内变化较小, 当导航接收机载噪比开始普遍出现下降时, 且此时无人机环境感知平台监测到干扰信号出现时, 记录上一时刻卫星信号的载噪比为初始载噪比。

2) 根据每颗卫星的初始载噪比和环境感知平台监测到双源电磁干扰信号的特征(频率和带宽), 通过 XGBoost 预测模型可以得出, 每颗卫星信号分别在两个干扰信号作用下的跟踪失锁阈值, 分别记为  $P_{i1}$  和  $P_{i2}$ , 其中  $i$  为卫星信号, 1 和 2 为双源电磁干扰信号的标记。

3) 利用环境感知平台测量得到双源电磁干

扰信号的功率分别为  $P_{j1}$  和  $P_{j2}$ , 然后根据带内双源电磁干扰下的效应模型, 如式(8)所示。

$$S_i = \frac{P_{j1}}{P_{i1}} + \frac{P_{j2}}{P_{i2}} \quad (8)$$

其中,  $S_i$  为当前双源电磁干扰下的压制系数。根据式(7)中的临界判据, 每颗卫星的电磁干扰余量为:

$$\Delta_i = 1 - S_i \quad (9)$$

同样假设接收机观测到的有效卫星为6颗, 且最低定位卫星数目要求为4颗, 根据干扰余量的值得到以下排序:

$$\Delta_i^1 \geq \Delta_i^2 \geq \Delta_i^3 \geq \Delta_i^4 \geq \Delta_i^5 \geq \Delta_i^6 \quad (10)$$

其中, 上标1、2、3、4、5、6为干扰余量由大到小的排序。当  $\Delta_i^6 = 0$  时, 双源电磁干扰信号的功率分别为  $P_{sm1}$  和  $P_{sm2}$ , 导航接收机的定位状态进入性能降级区域, 接收机内部开始出现卫星丢失的现象; 当  $\Delta_i^4 = 0$  时, 导航接收机内部有效卫星数已不满足最低定位要求, 接收机定位丢失, 此时双源电磁干扰信号的功率分别为  $P_{fm1}$  和  $P_{fm2}$ , 其中两个干扰信号具有多个功率组合。由于式(7)适用于窄带和宽带噪声干扰, 所以该评估方法同样适用于窄带和宽带噪声干扰。

### 3.3 无人机卫星导航系统抗干扰的技战法

对于一个屏蔽性能良好的导航接收机来说, 其“后门”耦合的可能性较小, 干扰能量主要通过天线耦合进入导航终端内部, 从而对导航终端形成干扰。在无人机飞行过程中, 当干扰信号的能量已经引起了导航终端出现性能降级的状态且临近定位丢失状态时, 为确保无人机的飞行安全, 可以采取如下技战法来确保无人机的飞行安全。

1) 改变无人机的飞行姿态: 通过改变无人机的飞行姿态, 调整无人机导航天线的方向图, 一方面将天线接收效率最低的方向对准干扰信号的来向, 另一方面确保天线的主方向图对准更多卫星信号的来向。一般来说, 与天线主瓣垂直的方向其增益最小, 将该方向对准干扰来向可以达到最大限度对干扰信号的抑制, 如图8所示。

2) 改变无人机的飞行轨迹: 一方面可以依据“远离干扰源”的指导原则, 调整无人机的飞行轨迹, 使其在水平和高度上远离干扰源, 达到降低天线对干扰信号耦合效率的目的; 另一方面由于干扰信号近地传播时损耗较大, 而导航信号受到的影响较小, 所以可以根据地形特点适时采取降低飞行高度的策略。

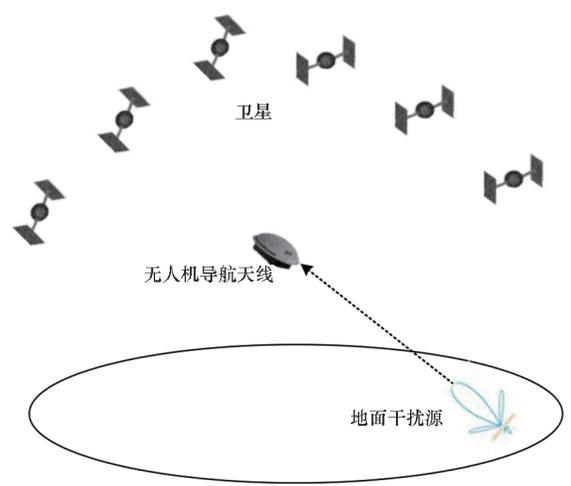


图8 无人机飞行姿态调整

Fig. 8 Flight attitude adjustment of the UAV

## 4 结论

卫星导航系统作为无人机的“眼睛”, 其定位功能受扰会严重影响无人机的作战效能, 本文利用机器学习的方法建立了导航接收机跟踪环路失锁效应阈值的预测模型, 给出了导航接收机电磁干扰态势的评估方法, 主要结论如下:

1) 通过开展试验, 得到影响跟踪环路失锁效应阈值的关键参数, 在此基础上利用 XGBoost 深度学习的方法构建了跟踪环路失锁效应阈值的预测模型, 该预测模型相对于 SVR 模型和 GPR 模型具有更高的训练精度以及预测精度。

2) 根据导航接收机在电磁干扰试验中的效应现象, 给出了导航接收机在电磁干扰态势下的受扰等级, 为接收机的电磁干扰态势评估提供依据。

3) 提出了导航接收机在单源以及双源电磁干扰下的态势评估方法, 利用该方法, 可以预测无人机飞行轨迹上卫星导航系统的电磁干扰态势, 使无人机提早进行技战法规划, 确保无人机的完好性以及任务的成功率。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴源维. 复杂电磁环境下无人机的战场应用[J]. 飞航导弹, 2011(1): 30-35.  
WU Y W. Battlefield application of UAV in complex electromagnetic environment [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(1): 30-35. (in Chinese)
- [2] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高压电技术, 2014, 40(6): 1605-1613.  
LIU S H, LIU W D. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605-1613. (in Chinese)

- [3] 张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 等. 用于无人机信息链路电磁干扰预测的动态电磁敏感度测试研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 665 - 672.  
ZHANG D X, CHEN Y Z, CHENG E W, et al. Research on dynamic electromagnetic susceptibility for electromagnetic interference prediction of UAV information link [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (2): 665 - 672. (in Chinese)
- [4] 梅浩, 战兴群, 李源, 等. 城市道路 GNSS 脆弱性评估技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 101 - 107.  
MEI H, ZHAN X Q, LI Y, et al. A GNSS vulnerability assessment technique of urban roads [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49 (4): 101 - 107. (in Chinese)
- [5] BAEK J, YOO S, KIM S Y. Jamming effect analysis of two Chinese GNSS BeiDou-II civil signals [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2012, 2(6): 840 - 845.
- [6] 胡锐. 卫星导航接收机强电磁脉冲耦合机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
HU R. Research on the coupling mechanism of strong electromagnetic pulse for satellite navigation receiver [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [7] 王子亮. 北斗导航接收机抗强电磁场损毁限幅电路研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
WANG Z L. Study on the limiter of BeiDou navigation receiver under strong electromagnetic field [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [8] 范宇清, 程二威, 魏明, 等. 高功率微波弹对 GNSS 接收机毁伤效果分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(1): 37 - 44.  
FAN Y Q, CHENG E W, WEI M, et al. Analysis of damage effect of high-power microwave bomb on GNSS receiver [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42 (1): 37 - 44. (in Chinese)
- [9] 赵惠昌, 张淑宁. 电子对抗理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 124 - 129.  
ZHAO H C, ZHANG S N. Theory and method of electronic countermeasures [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 124 - 129. (in Chinese)
- [10] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 341 - 344.  
XIE G. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 341 - 344. (in Chinese)
- [11] LIU Y Q, RAN Y H, KE T, et al. Code tracking performance analysis of GNSS signal in the presence of CW interference [J]. Signal Processing, 2011, 91 (4): 970 - 987.
- [12] 叶倩怡. 基于 XGBoost 方法的实体零售业销售额预测研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.  
YE Q Y. Study on sales forecasts of stores based on XGBoost method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. (in Chinese)
- [13] 贾文慧. 基于 XGBoost 算法的骨科辅助诊断模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.  
JIA W H. Research on auxiliary diagnosis model of orthopedics based on XGBoost algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 谈林涛, 李军良, 任昺, 等. 基于 RB-XGBoost 算法的智能电网调度控制系统健康度评价模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 189 - 198.  
TAN L T, LI J L, REN B, et al. Health evaluation model of smart grid dispatch and control system based on RB-XGBoost algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 189 - 198. (in Chinese)
- [15] 逯晓瞳. 基于 XGBoost 方法的 ND 公司门店销售预测研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
LU X T. Research on sales forecasts of ND company stores based on the XGBoost method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 李伟, 魏光辉, 潘晓东, 等. 复杂电磁环境下通信装备干扰预测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2782 - 2789.  
LI W, WEI G H, PAN X D, et al. Interference prediction method of communication equipment under complex electromagnetic environment [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39 (11): 2782 - 2789. (in Chinese)