

一种优化窄带低轨卫星通信对导航信号接收干扰的方法

谭富元, 易 川, 袁 谅

(中国星网网络应用有限公司, 重庆 401121)

摘 要: 随着卫星通信技术的发展和进步, 窄带低轨通导一体终端的应用备受关注。但是, 窄带低轨通导一体终端发射通信信号时, 通常会对导航信号接收产生干扰, 直接影响终端定位业务。为解决该问题, 提出了一种优化窄带低轨卫星通信对导航信号接收干扰的方法。该方法首先构建了一种“信号目标范围模型”, 然后基于差分算法提出了一种新的检测算法, 用于确定同时满足通信和导航业务要求的天线方向更优个体解。一旦检测到干扰情况, 基于该方法迅速调整通信天线与导航天线方向, 使导航接收信号恢复正常。通过 MATLAB 对该方法进行了仿真实验, 实验结果进一步证明了该方法的可行性。

关键词: 卫星通信; 通导一体终端; 目标模型; 差分算法

中图分类号: TN927.2; TN967.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19358/j.issn.2097-1788.2026.05.006

中文引用格式: 谭富元, 易川, 袁谅. 一种优化窄带低轨卫星通信对导航信号接收干扰的方法[J]. 网络安全与数据治理, 2026, 45(5): 40-47.

英文引用格式: Tan Fuyuan, Yi Chuan, Yuan Liang. A method for optimizing the interference of narrowband low-orbit satellite communication on the reception of navigation signals[J]. Cyber Security and Data Governance, 2026, 45(5): 40-47.

A method for optimizing the interference of narrowband low-orbit satellite communication on the reception of navigation signals

Tan Fuyuan, Yi Chuan, Yuan Liang

(China StarNet Network Application Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: With the development and progress of satellite communication technology, the application of narrowband low-orbit integrated communication and navigation terminals has attracted much attention. However, when narrowband low-orbit integrated communication and navigation terminals transmit communication signals, they usually interfere with the reception of navigation signals, directly affecting the positioning services of the terminals. To solve this problem, a method for optimizing the interference of narrowband low-orbit satellite communication on the reception of navigation signals is proposed. This method first constructs a "signal target range model", and then proposes a new detection algorithm based on the differential algorithm to determine the antenna direction with better individual solutions that simultaneously meet the requirements of communication and navigation services. Once interference is detected, the communication antenna and navigation antenna directions are quickly adjusted based on this method to restore the normal reception of navigation signals. The method was simulated and experimented with MATLAB, and the experimental results further prove the feasibility of the method.

Key words: satellite communication; integrated communication and navigation terminals; target model; differential algorithm

0 引言

窄带低轨卫星网络凭借覆盖范围广、传输时延低、部署灵活等优势^[1-3], 已成为全球通信网络补盲、泛在连接的核心支撑技术, 在物联网、应急通信、偏远地区接入等场景中展现出不可替代的价值^[4-5]。

随着行业应用市场需求增长, 以结合窄带低轨卫星通信方案和导航方案为一体的通导一体终端备受关

注, 应用前景广阔^[6-7]。针对车联网、航空航海、智慧城市、物流追踪、灾害救灾等场景, 行业厂家已陆续基于窄带低轨通导一体终端研制相关解决方案, 例如窄带低轨通导一体手持终端、窄带低轨通导一体便携终端等。

但是, 窄带低轨通导一体终端在发射窄带低轨卫星通信信号时, 其产生的杂散、谐波等非期望辐射信

号,易对导航信号接收产生干扰,导致终端接收到的导航数据异常,直接影响终端定位业务^[8-10],该问题在通信与导航天线间距较近的小型化通导一体终端中表现尤为突出。因此,如何有效降低窄带低轨卫星通信对导航信号接收所产生的干扰,已成为窄带低轨通导一体终端应用和推广的关键技术问题。

1 文章研究的问题

为解决低轨通导一体终端信号干扰问题,王腾^[11]等人提出了一种基于多普勒信息的低轨卫星/惯性组合导航定位方法,利用低轨卫星的多普勒频移信息与惯性导航系统进行组合解算,解决了低轨卫星导航中轨道与钟差等先验信息不完备、卫星导航信号受遮挡或干扰时,定位精度与稳定性下降的问题。赵斌^[12]等人提出了一种低轨卫星互联网终端监测、定位和干扰的设备,利用相控阵发射天线和伺服转台实现对目标区域内卫星下行信号的终端进行干扰压制。江城^[13]等人提出了一种面向低轨卫星通信和导航一体化的资源调度方法和装置,通过有效的波束赋形设计来抑制小区间干扰,并给予合理的服务卫星选择,保证定位和导航服务的精度。但是,上述方案并不能解决或者降低窄带低轨卫星通信对导航信号接收产生的干扰。

为解决上述方案存在的不足,在现有差分算法框架下^[14],本文提出了一种优化窄带低轨卫星通信对导航信号接收干扰的方法,首先构建了一种“信号目标范围模型”,然后基于差分算法提出了一种新的检测算法——差分马氏进化检测算法,该算法构建了一种新的适应度函数,用于确定同时满足窄带低轨卫星通信和导航业务要求的天线方向更优个体解。在窄带通导一体终端同时开展低轨通信和导航定位业务过程中,一旦检测到终端发射窄带低轨卫星通信信号已对导航接收信号产生明显干扰,即通过本方法输出天线方向更优个体解,用于指导方向调整模块旋转,调整窄带低轨卫星天线与导航天线的方向,使导航接收信号恢复有效状态,同时确保窄带低轨卫星通信业务也处于有效状态。

本文主要贡献如下:

(1) 为解决窄带低轨卫星通信对导航信号接收的干扰问题,提出一种基于马氏距离与差分进化的自适应天线角度求解算法,以保障窄带低轨通导一体终端通导业务正常开展。

(2) 在现有差分算法框架下,本文提出的算法添加了历史表的临时存储,将信号检测模块的检测过程

转换为查表过程,加速了求解过程,提高了算法效率。

(3) 本文提出的方法将通信天线、导航天线的仰角与方位角统一建模为一个四维角度优化变量空间,从几何空间的角度解决低轨卫星通信信号对导航接收的干扰问题。

2 方法架构设计

本文以窄带低轨卫星通信场景下的通导一体终端为研究对象,选取船载通导一体原型终端作为典型实例展开详细阐述,该方案同样适用于手持、便携、机载、车载等各类小型化通导一体终端,具备极强的场景适配性与设备通用性。

终端因集成了通信模块和导航模块,本身支持窄带低轨卫星通信业务(例如语音、短信等)和导航业务(例如GNSS/GPS定位等)。为了更详细描述本方案的具体实施,本文在船载通导一体原型终端内构造了四个模块,分别是业务检测模块、信号检测模块、计算存储模块和方向调整模块,如图1所示。

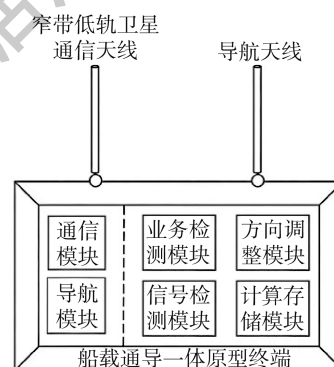


图1 船载通导一体原型终端示意图

业务检测模块:实时监测并判定通信、导航业务的运行状态,核查窄带低轨卫星通信入网、语音、短报文等业务的正常性,同时校验导航模块GNSS数据接收、定位解算等功能的有效性。

信号检测模块:监测通信、导航模块的信号质量,采集通信信号强度、导航载干比等关键参数;在业务检测模块确认业务正常运行后,将有效信号参数实时传输至计算存储模块。

计算存储模块:基于信号检测模块上传的原始数据,完成信号目标范围模型构建、差分马氏进化检测算法运算等核心工作,输出天线方向最优个体解。

方向调整模块:受业务检测模块控制,当判定导航业务受通信业务严重干扰时,接收计算存储模块输出的最优解,对通信天线与导航天线进行方向微调,

使导航信号恢复有效状态。需要特别说明的是, 天线物理旋转执行过程不属于本文研究范畴。

无论终端是固定式船载设备, 还是手持式便携终端、可穿戴轻量化终端, 仅需根据设备体积、供电规格、安装方式做硬件适配与参数微调, 核心模块架构、工作逻辑、实施方法均可直接复用, 无需对整体方案进行颠覆性改动, 充分保证了方法的通用性、可移植性与扩展性。

3 方法具体实施

为了更好地说明本方法的实施流程, 构建方法总体流程图如图 2 所示。

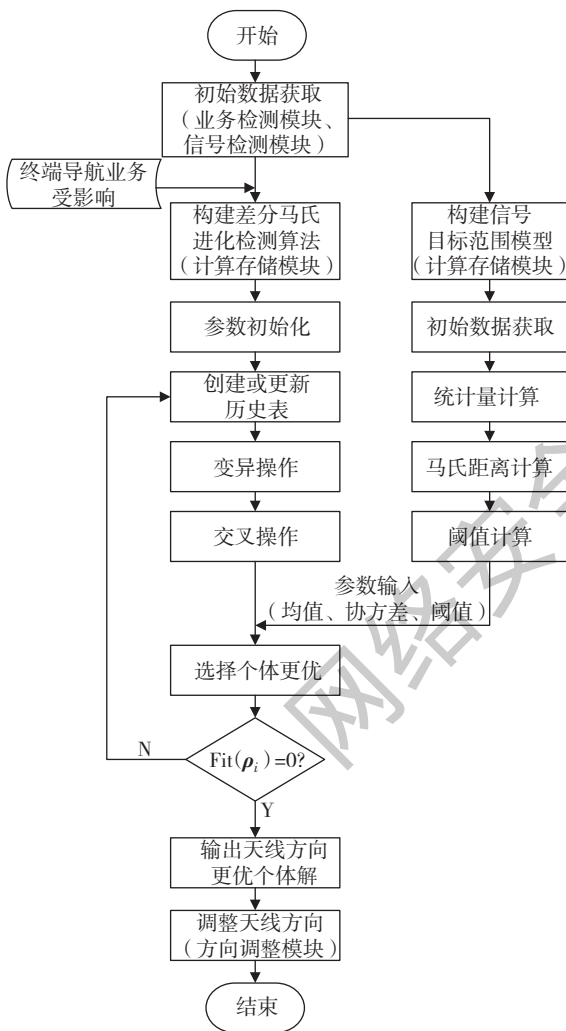


图2 方法总体流程图

3.1 构建信号目标范围模型

构建信号目标范围模型流程图如图 3 所示。

3.1.1 初始数据获取

信号检测模块提供的数据包含了 n 组数据 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 。 $\mathbf{X}$ 的表示如下:

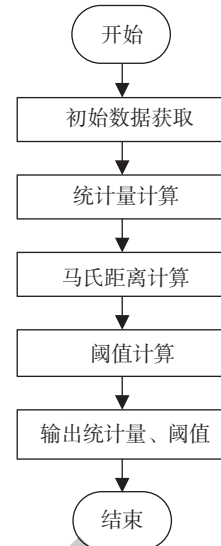


图3 构建信号目标范围模型流程图

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{i,1} & x_{i,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 第 i ($1 \leq i \leq n$) 组数据 $x_{i,1}$ 和 $x_{i,2}$ 分别是通信模块在正常通信情况下的信号强度值和导航模块在正常做导航业务情况下的载干比值。

为了便于区分, 记 $\mathbf{X}_{\text{comm}} = [x_{1,1} \cdots x_{i,1} \cdots x_{n,1}]$, $\mathbf{X}_{\text{nav}} = [x_{1,2} \cdots x_{i,2} \cdots x_{n,2}]$ 。

3.1.2 模型构建

(1) 统计量计算

对正常通信下的信号强度 $\mathbf{X}_{\text{comm}}$ 和正常开展导航业务下的载干比 $\mathbf{X}_{\text{nav}}$ 做计算, 分别得到它们的均值 u_{comm} 、 u_{nav} 和协方差 σ_{comm} 、 σ_{nav} 。计算公式如下:

$$u_{\text{comm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,1} \quad (2)$$

$$u_{\text{nav}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,2} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{comm}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,1} - u_{\text{comm}})(x_{i,1} - u_{\text{comm}})} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{nav}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,2} - u_{\text{nav}})(x_{i,2} - u_{\text{nav}})} \quad (5)$$

(2) 马氏距离计算

对于第 i ($1 \leq i \leq n$) 组数据 $\mathbf{x}_i = [x_{i,1} \ x_{i,2}]$, 分别计算它在正常通信下的信号强度和正常开展导航业务下的载干比所对应的马氏距离 $D_{\text{comm}}^{(i)}$ 和 $D_{\text{nav}}^{(i)}$, 公式如下:

$$D_{\text{comm}}^{(i)} = \frac{|x_{i,1} - u_{\text{comm}}|}{\sigma_{\text{comm}}} \quad (6)$$

$$D_{\text{nav}}^{(i)} = \frac{|x_{i,2} - u_{\text{nav}}|}{\sigma_{\text{nav}}} \quad (7)$$

(3) 阈值获取

在构建信号目标范围模型过程中,为区分正常样本与异常样本,引入了异常阈值。该阈值是界定正常和异常的关键值。现令正常通信信号强度下的 n 个样本对应的马氏距离序列为 $L_{\text{comm}} = \{D_{\text{comm}}^{(1)}, D_{\text{comm}}^{(2)}, \dots, D_{\text{comm}}^{(n)}\}$, 正常开展导航业务下的载干比的 n 个样本对应的马氏距离序列为 $L_{\text{nav}} = \{D_{\text{nav}}^{(1)}, D_{\text{nav}}^{(2)}, \dots, D_{\text{nav}}^{(n)}\}$ 。通过快速排序方法(升序)对两个序列进行排序,得到排序后的序列为 $\text{sorted}(L_{\text{comm}})$ 和 $\text{sorted}(L_{\text{nav}})$ 。

基于上述两个有序序列,计算其对应的阈值:

$$\delta_{\text{comm}} = \text{sorted}(L_{\text{comm}})_k \quad (8)$$

$$\delta_{\text{nav}} = \text{sorted}(L_{\text{nav}})_k \quad (9)$$

$\text{sorted}(L_{\text{comm}})_k$ 和 $\text{sorted}(L_{\text{nav}})_k$ 分别表示在 $\text{sorted}(L_{\text{comm}})$ 和 $\text{sorted}(L_{\text{nav}})$ 上的第 k 个值, $k = \lfloor 0.95 \times (n-1) + 1 \rfloor$, 其中 0.95 是常用到的分段点^[15]。

(4) 异常判断

异常判断指的是判断一组新的数据 $\mathbf{x}_{\text{new}} = [x_{\text{new},1}, x_{\text{new},2}]$ 是否异常,数据判断为非异常应满足如下条件:

$$\begin{cases} \frac{|x_{\text{new},1} - u_{\text{comm}}|}{\sigma_{\text{comm}}} \leq \delta_{\text{comm}} \\ \frac{|x_{\text{new},2} - u_{\text{nav}}|}{\sigma_{\text{nav}}} \leq \delta_{\text{nav}} \end{cases} \quad (10)$$

一旦 $\mathbf{x}_{\text{new}}$ 不满足上述条件,那么数据被判断为异常数据,即当前的通信天线和导航天线处于不合理的位置。

到此,完成了信号目标范围模型的构建,其中统计量(均值 u_{comm} 、 u_{nav} 和协方差 σ_{comm} 、 σ_{nav})和阈值(δ_{comm} 、 δ_{nav})将作为后续算法的输入,用于差分马氏进化检测算法计算。

3.2 构建差分马氏进化检测算法

构建差分马氏进化检测算法的流程如图4所示。

3.2.1 参数初始化

随机生成 N (N 可以取任意整数值)个可能的解,每个解 $\boldsymbol{\rho}_i$ 表示为 $\boldsymbol{\rho}_i = [\rho_{i,1} \ \rho_{i,2} \ \rho_{i,3} \ \rho_{i,4}]$ 。其中, $\rho_{i,1}$ 和 $\rho_{i,3}$ 分别表示窄带低轨卫星通信天线和导航天线的仰角, $\rho_{i,2}$ 和 $\rho_{i,4}$ 分别表示窄带低轨卫星通信天线和导航天线的方向角。两个仰角的取值范围为 $(0, \pi/2]$, 两个方向角的取值范围为 $(0, 2\pi]$ 。

3.2.2 创建或更新历史表 T

创建一张历史表 T, 历史表存储于计算存储模块,

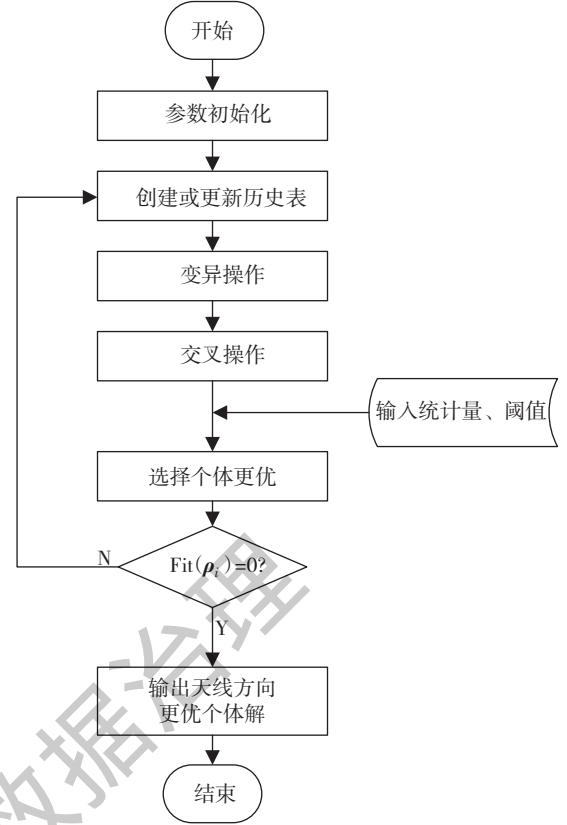


图4 构建差分马氏进化检测算法流程图

该历史表用于后续的适应度函数值计算。表头的设置如表1所示。

表1 历史表 T 的表头设计

窄带低轨 卫星通信 天线仰角	窄带低轨 卫星通信 天线方向角	导航天线 仰角	导航天线 方向角	模块信号值	适应度值
$\rho_{i,1}$	$\rho_{i,2}$	$\rho_{i,3}$	$\rho_{i,4}$	$\mathbf{x}'_i = [x'_{i,1} \ x'_{i,2}]$	f_i

在历史表 T 中记录的全部是业务检测模块检测业务异常下的数据,其中模块信号值由信号检测模块检测到的通信模块的信号强度值 $x'_{i,1}$ 和导航模块的载干比值 $x'_{i,2}$ 组成(与上述 $\mathbf{X}$ 或 $\mathbf{x}_i$ 无关联),适应度值用于评估解是否异常,其计算过程对应后续步骤中对 $\text{Fit}(\boldsymbol{\rho}_i)$ 的定义。

3.2.3 变异操作

对每个个体 $\boldsymbol{\rho}_i = [\rho_{i,1} \ \rho_{i,2} \ \rho_{i,3} \ \rho_{i,4}]$ ($1 \leq i \leq n$) 执行变异操作,生成如下所示的候选个体 $\mathbf{v}_i = [v_{i,1} \ v_{i,2} \ v_{i,3} \ v_{i,4}]$:

$$\mathbf{v}_i = \boldsymbol{\rho}_j + 0.8 \times (\boldsymbol{\rho}_k - \boldsymbol{\rho}_l) \quad (11)$$

其中, j 、 k 和 l 是在 1 到 n 上互不相同的随机索引,且 $j \neq k \neq l \neq i$ 。0.8 是基于现有粒子群算法中对变异参数的相关研究所采用的较为成熟且被广泛使用的参数设置^[16]。若 $\mathbf{v}_i$ 在两个仰角和两个方向角上不满足在参数

初始化中提到的取值范围, 可通过取模确保其都满足约束条件。例如, v_i 在仰角维度不满足约束条件, 则 $v_{i,1} = \rho_{i,1} \bmod \frac{\pi}{2}$ 或者 $v_{i,3} = \rho_{i,3} \bmod \frac{\pi}{2}$ 。相似地, v_i 在方向角维度不满足约束条件, 则 $v_{i,2} = \rho_{i,2} \bmod 2\pi$ 或者 $v_{i,4} = \rho_{i,4} \bmod 2\pi$ 。

3.2.4 交叉操作

基于变异操作生成的候选个体 $v_i = [v_{i,1} \ v_{i,2} \ v_{i,3} \ v_{i,4}]$, 通过二项交叉生成试验个体 $t_i = [t_{i,1} \ t_{i,2} \ t_{i,3} \ t_{i,4}]$ 。其中, $t_{i,j}$ 的赋值满足下述规则:

$$t_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{rand}(0, 1) \leq 0.8 \\ \rho_{i,j}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq 4) \quad (12)$$

$\text{Fit}(\rho_i) =$

$$\begin{cases} \text{历史表的 } f_i, & \text{T 中查询成功} \\ 0, & \frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) - u_{\text{comm}}|}{\sigma_{\text{comm}}} \leq \delta_{\text{comm}} \text{ 且 } \frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) - u_{\text{nav}}|}{\sigma_{\text{nav}}} \leq \delta_{\text{nav}}, \text{ 且 T 中查询为空} \\ \frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) - u_{\text{comm}}|}{\sigma_{\text{comm}}} + \frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) - u_{\text{nav}}|}{\sigma_{\text{nav}}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\text{Search}(\rho_i, \text{comm})$ 和 $\text{Search}(\rho_i, \text{nav})$ 分别表示信号检测模块在天线角度 ρ_i 下检测到的通信模块的信号强度值 $x'_{i,1}$ 和导航模块的载干比值 $x'_{i,2}$, 即 $\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) = x'_{i,1}$, $\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) = x'_{i,2}$ 。在上述 $\text{Fit}(\ast)$

函数的定义中, $\frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) - u_{\text{comm}}|}{\sigma_{\text{comm}}} \leq \delta_{\text{comm}}$ 且 $\frac{|\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) - u_{\text{nav}}|}{\sigma_{\text{nav}}} \leq \delta_{\text{nav}}$ 表示数据正常, 满足正常通信下正常做导航业务的要求。反之, 则表示数据异常。

另外, 整个算法需要对历史表 T 执行查询操作, 查询过程主要是在 T 中寻找存在一条记录 (ρ_k, x'_k, f_k) , 若记录中的 $\rho_k = \rho_i$ 或者符合条件 $x'_{k,1} \leq x'_{i,1}$ 且 $x'_{k,2} \leq x'_{i,2}$, 则表示查询成功, 此时不用再进行适应度函数值计算, 以提高算法整体效率。反之, 则查询为空。特别的, 此处规定: 信号强度取值范围为 0 ~ 31, 数值越大代表信号强度越好; 载干比取值范围为 0 ~ 36, 数值越大代表载干比越好。

在更新最优个体过程中, 历史表 T 同样需要对应更新, 其更新规则为: 对于试验个体 t_i 或者 ρ_i , 一旦查询为空, 当它们计算得到对应的适应度函数值 $\text{Fit}(t_i)$ 或 $\text{Fit}(\rho_i)$ 后, 历史表 T 分别增加一条记录 $(t_i, \text{temp}(t_i), \text{Fit}(t_i))$ 或者 $(\rho_i, \text{temp}(\rho_i), \text{Fit}(\rho_i))$, 其中 $\text{temp}(t_i)$ 和 $\text{temp}(\rho_i)$ 表示如下:

3.2.5 选择个体更优

比较试验个体 $t_i = [t_{i,1} \ t_{i,2} \ t_{i,3} \ t_{i,4}]$ 和 $\rho_i = [\rho_{i,1} \ \rho_{i,2} \ \rho_{i,3} \ \rho_{i,4}]$ 的适应度函数值, 选择更优的个体 (适应度函数值最小的解), 从而更新 ρ_i 的个体最优 (解)。

$$\rho_i = \begin{cases} t_i, & \text{Fit}(t_i) \leq \text{Fit}(\rho_i) \\ \rho_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\text{Fit}(\ast)$ 是差分进化框架下的适应度函数, 它通过计算适应度函数值来衡量生成个体的好坏^[14]。在本文提出的算法中, 定义差分马氏进化检测的适应度函数, 以 $\text{Fit}(\rho_i)$ 为例, 给出 $\text{Fit}(\ast)$ 函数的定义如下:

$$\text{temp}(t_i) = [\text{Search}(t_i, \text{comm}), \text{Search}(t_i, \text{nav})] \quad (15)$$

$$\text{temp}(\rho_i) = [\text{Search}(\rho_i, \text{comm}), \text{Search}(\rho_i, \text{nav})] \quad (16)$$

3.2.6 迭代和终止

返回 3.2.3 节步骤, 重新执行 3.2.3 ~ 3.2.6 节的过程, 直到更新后的 N 个个体中存在一个解 ρ_i 满足 $\text{Fit}(\rho_i) = 0$, 此时算法收敛, 即求得了天线的最优仰角与方向角。 $\text{Fit}(\rho_i) = 0$ 是差分进化算法框架中判断优化过程是否已经稳定和无需继续迭代的依据^[14]。算法一旦结束, 清空历史表 T, 返回满足条件的 ρ_i 。方向调整模块将根据 ρ_i 分别调整窄带低轨卫星通信天线和导航天线的仰角和方向角。

4 仿真实验验证

4.1 信号目标范围模型的仿真

为了验证构建信号目标范围模型的有效性, 收集到 150 组正常业务下的信号强度值和载干比值, 50 组异常业务下的信号强度值和载干比值, 其中针对 150 组正常数据, 随机挑选 100 组数据用于训练构建信号目标范围模型, 剩下的 50 组正常数据和 50 组异常数据组合用于验证训练好的模型。该划分方式执行 10 次, 得到 10 组不同的数据进行训练和测试, 通过 MATLAB 仿真测试, 结果如表 2 所示。其中, 精准率

是被预测为“异常”的样本中真正是异常的比例；召回率是在所有真实异常样本中，被成功检测出的比例。

表2 信号目标范围模型验证表

序号	精准率/%	召回率/%
1	86	100
2	92	100
3	95	96
4	92	92
5	88	90
6	90	100
7	91	98
8	95	98
9	100	100
10	88	94

表2显示，实验在10次不同的数据上，召回率始终不低于90%，结果表明构建信号目标范围模型有效识别到了异常数据。

4.2 天线方向调整的仿真

为了验证本文在天线方向调整上的有效性，进行了如下实验：

整个仿真实验中，假定窄带低轨卫星通信天线的仰角和方向角分别在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[0^\circ, 180^\circ]$ 范围内，同时导航天线的仰角和方向角分别在 $[0^\circ, 90^\circ]$

和 $[0^\circ, 90^\circ] \cup [270^\circ, 360^\circ]$ 范围内（可以替换成其他角度值）。为了方便仿真实验的进行，简化检测模块上的检测过程，即当窄带低轨卫星通信天线和导航天线的角度为 ρ 时，如果 ρ 不在上述假定的仰角和方向角范围内，则认为检测到的信号强度值和载干比值均为0，即 $\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) = 0$ 和 $\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) = 0$ ；反之，认为 $\text{Search}(\rho_i, \text{comm}) = u_{\text{comm}}$ 和 $\text{Search}(\rho_i, \text{nav}) = u_{\text{nav}}$ 。

当窄带低轨卫星通信天线的仰角和方向角分别为 77° 和 258° ，导航天线的仰角和方向角分别为 68° 和 223° 时业务出现异常，如图5所示。

在方向调整模块执行了本文差分马氏进化检测算法后，窄带低轨卫星通信天线和导航天线均处在了有效范围内，效果图如图6所示。

为了验证算法的收敛性和及时性，本文给出了差分马氏进化检测算法的检测过程，如图7所示。可以看到：算法在第32次的迭代中出现收敛。

为了避免偶然性，本文对窄带低轨卫星通信天线和导航天线的初始位置（包含仰角和方向角）随机了多组数据，给出对应结果如表3所示。其中，窄带低轨卫星通信天线仰角和方向角分别用 φ_1 和 θ_1 表示，导航天线仰角和方向角分别用 φ_2 和 θ_2 表示。

表3的多组数据验证结果表明差分马氏进化检测算法可以在30~40次的范围内收敛，每组实验时间见表4。收敛后的结果和时间开销都能够符合窄带低轨通导一体终端正常通信和导航接收的需求，进一步证明了本方法的可行性。

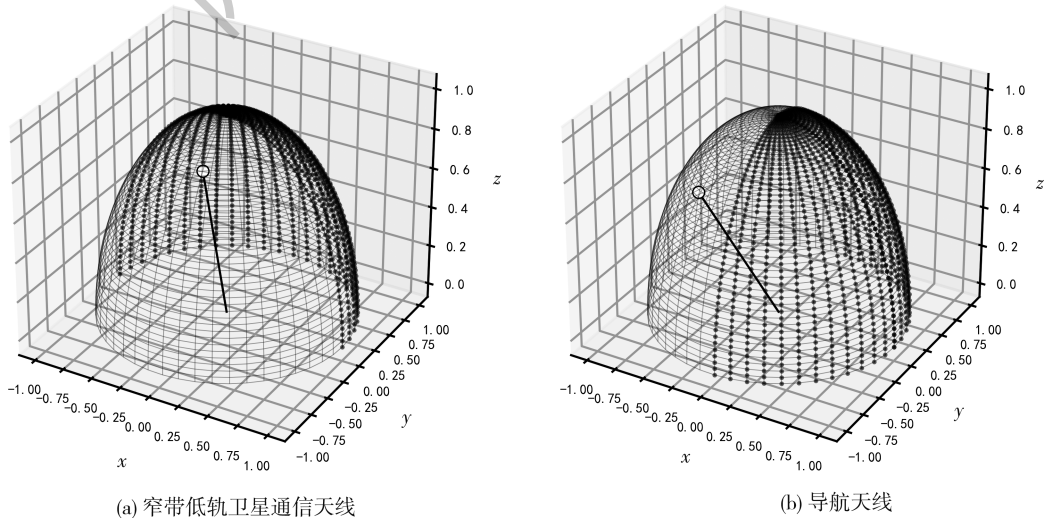


图5 窄带低轨卫星通信天线和导航天线在执行算法前的效果图（业务异常）

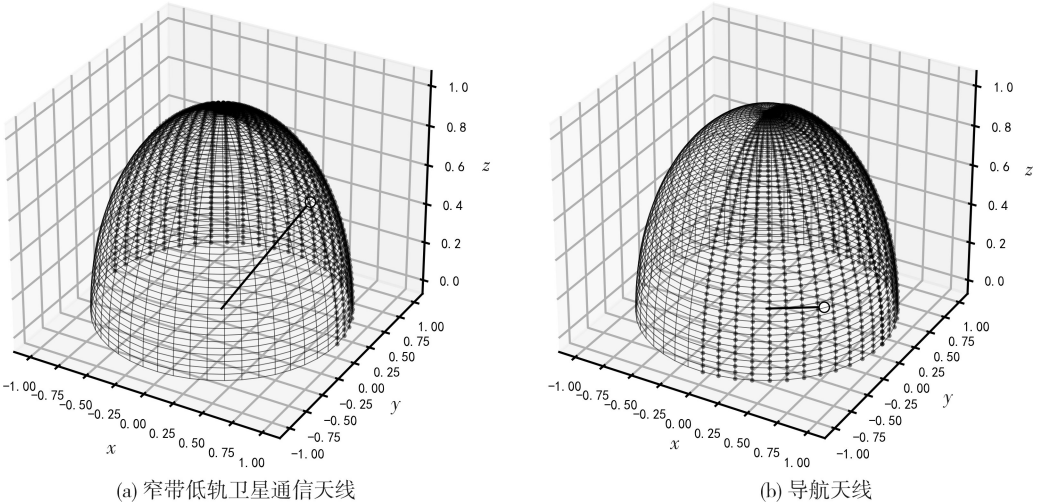


图6 窄带低轨卫星通信天线和导航天线在执行算法后的效果图（业务正常）

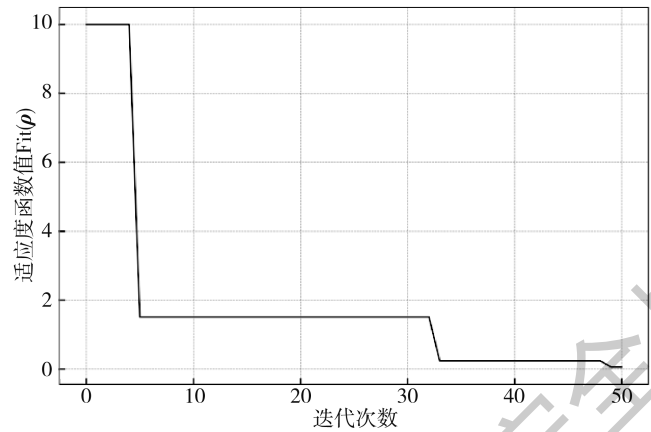


图7 差分马氏进化检测算法的检测过程图

表3 多组数据验证

序号	φ_1	θ_1	φ_2	θ_2	迭代 次数	调整后 的 φ_1	调整后 的 θ_1	调整后 的 φ_2	调整后 的 θ_2
1	69°	275°	16°	76°	36	67°	87°	79°	72°
2	33°	191°	34°	189°	27	30°	90°	88°	298°
3	80°	200°	41°	200°	25	80°	66°	74°	304°
4	31°	212°	56°	165°	31	54°	78°	67°	275°
5	48°	350°	90°	45°	29	63°	79°	86°	49°
6	76°	270°	62°	181°	31	77°	59°	49°	69°

表4 多组数据实验时间

序号	1	2	3	4	5	6
时间/s	10.2	8.7	8.5	6.1	7.8	11.2

5 结论

本文基于窄带低轨卫星通导一体终端应用场景，设计了一种优化窄带低轨卫星通信对导航信号接收干

扰的方法，通过求得的天线方向更优解指导方向模块调整窄带低轨卫星通信天线和导航天线的方向，使导航接收信号恢复有效状态，同时确保窄带低轨卫星通信业务也处于有效状态。

仿真实验结果表明，本文方法对降低窄带低轨卫星通信对导航信号接收产生的干扰具有显著效果，能够有效保障窄带低轨卫星通导一体终端业务正常运作，对提升窄带低轨卫星通导融合业务的实际部署具有重要的应用价值。

参考文献

[1] 刘旭光, 何文雯, 李浩, 等. 卫星互联网发展及星链系统通信能力分析[J]. 航天电子对抗, 2025, 41 (5): 36 – 40, 72.

[2] 章凌凡, 李坤江, 杨睿, 等. 面向“广播+通信”卫星融合应用网络架构的研究[J]. 移动通信, 2025, 49 (10): 112 – 118.

[3] 邹恒光, 惠腾飞, 翟盛华, 等. 卫星通信技术发展综述[J]. 空间电子技术, 2025, 22 (S1): 1 – 19.

[4] 戴翠琴, 程白凡, 吴旭帆, 等. 手机直连卫星通信组网关键技术研究[J/OL]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 1 – 13 [2026 – 01 – 04]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1181.n.20251125.1435.008>.

[5] 渠慎宁. 未来网络产业: 技术演进、大国竞争与发展路径[J]. 改革, 2025 (1): 81 – 92.

[6] 麻军伟, 刘若辰, 翟建勇, 等. 基于低轨星座的卫星导航增强系统技术研究[J]. 现代导航, 2024, 15 (6): 398 – 403.

[7] 孙耀华, 彭木根, 赵亚飞, 等. 低轨卫星互联网: 从星地融合迈向通导遥一体化[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47 (6): 69 – 98.

[8] 宋玉龙, 杨春宝. 低轨对北斗信号的影响及干扰消除算

- 法[J]. 电子设计工程, 2025, 33 (2): 81–85.
- [9] FOREMAN-CAMPINS G, LÓPEZ-SALCEDO J A, LOHAN E S. A comparative study on ranging accuracy and interference robustness of LEO-PNT systems in urban and rural scenarios[J]. Satellite Navigation, 2025, 6 (1): 29–29.
- [10] 李梦园, 麻军伟, 张亮儒, 等. 北斗卫星导航系统与 L 波段通信系统的频率兼容性研究[J]. 现代导航, 2025, 16 (4): 256–262, 268.
- [11] 北京自动化控制设备研究所. 一种基于多普勒信息的低轨卫星/惯性组合导航定位方法: CN202010643828.4[P]. 2020–11–20.
- [12] 北京有生志广科技有限公司. 低轨卫星互联网终端监测、定位和干扰的设备和控制软件: CN202410367458.4[P]. 2024–06–28.
- [13] 北京邮电大学. 面向低轨卫星通信和导航一体化的资源调度方法和装置: CN202411294369.8[P]. 2025–03–18.
- [14] 汪奇, 谭飞, 熊兴中, 等. 基于自适应动态策略差分算法研究与应用[C]//第36届中国过程控制会议论文集(上), 2025: 133–137.
- [15] GRIFFITHS D. 深入浅出统计学[M]. 李芳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [16] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.

(收稿日期: 2026–03–06)

作者简介:

谭富元 (1992–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 卫星互联网通信模组应用方案设计与论证。

易川 (1989–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 卫星互联网通信芯片、模组、测试系统总体设计与论证。

袁谅 (1989–), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 卫星互联网通信模组测试方案设计与论证。

“密码前沿技术与应用”主题专栏征稿启事

随着量子计算技术的快速发展、人工智能与大模型应用的广泛渗透, 以及数据要素市场化对隐私保护的迫切需求, 密码学作为网络空间安全的核心支撑, 正迎来前所未有的机遇与挑战。一方面, 能够抵抗量子计算攻击的后量子密码算法正加速从理论走向标准化与工程化部署, 另一方面, 数字经济的深化催生了隐私计算技术的爆发, 全同态加密、安全多方计算等展现出巨大应用潜力, 与此同时, 人工智能与大模型的崛起, 既为密码分析提供了新的范式, 也对密码技术保护 AI 安全提出了新的需求。为了集中展示我国在密码前沿领域的创新成果, 促进学术交流与产学研深度融合, 《网络安全与数据治理》拟在 2026 年第 8 期推出“密码前沿技术与应用”主题专栏。现诚邀相关领域的专家学者、科研人员踊跃投稿。

一、征文主题: 密码前沿技术与应用

包括但不限于以下学术方向:

- 抗量子计算密码: 后量子密码算法的设计、分析、侧信道防护及标准化迁移应用。
- AI 与密码学融合: 利用 AI 进行密码算法辅助设计/自动化分析; 密码技术在 AI 模型安全中的应用。
- 前沿隐私计算技术: 全同态加密、安全多方计算、零知识证明、差分隐私等。
- 轻量级密码与物联网安全: 面向资源受限设备的密码算法及物联网安全协议。
- 数字身份与零信任安全: 抗量子身份认证、分布式数字身份、零信任架构。
- 可信数据空间密码技术: 面向可信数据空间的密码技术与应用。
- 新型密码分析与评估: 量子环境下的密码分析、自动化安全评估平台。

二、投稿要求

- 稿件请用 word 格式录入, 并套用本刊模板 ([http://](http://files.chinaaet.com/files/Periodical/pcachina_Templates.doc)

files.chinaaet.com/files/Periodical/pcachina_Templates.doc)。

- 投稿文章不存在一稿多投现象。
- 无抄袭、剽窃、侵权、虚假引用等不良学术行为, 且不违反相关法律法规, 不涉及国家、企业秘密, 稿件文责自负。
- 论文要求观点鲜明、逻辑严谨、论据充分、方法合理, 字数在 5000~8000 字。
- 请在官方投稿网站 (<http://www.pcachina.com>) 注册、投稿。投稿请选“主题专栏”栏目, “稿件标题”填写“密码技术+文章题目”。稿件经评审合格录用后, 在《网络安全与数据治理》2026 年第 8 期 (正刊) 以主题专栏形式发表。

三、时间安排

截稿日期: 2026 年 6 月 30 日

审稿反馈日期: 2026 年 7 月 15 日

出版日期: 2026 年 8 月 15 日

《网络安全与数据治理》编辑部
2026 年 3 月

版权声明

凡《网络安全与数据治理》录用的文章，如作者没有关于汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权等版权的特殊声明，即视作该文章署名作者同意将该文章的汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权授予本刊，本刊有权授权本刊合作数据库、合作媒体等合作伙伴使用。同时，本刊支付的稿酬已包含上述使用的费用，特此声明。

《网络安全与数据治理》编辑部

www.pcachina.com