

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210015

# 一种基于载波相位测量的阵列天线自适应校正技术\*

赵 军 苏润佳

(中国电子科技集团公司第五十四研究所卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

**摘要:** 针对卫星导航阵列抗干扰处理过程中的阵列校正问题,本文采用一种基于载波相位测量的阵列天线自适应校正技术。利用阵列天线各阵元分别接收同一颗卫星信号,分别进行捕获、跟踪、观测量提取等,获取指定卫星各通道载波相位,求取载波相位差,计算各通道间误差,对阵列天线幅相不一致性进行校正,从而降低幅相不一致性对抗干扰算法性能的影响。相比于传统阵列天线自适应校正算法,具有以下优点:可针对每颗卫星进行单独校正;可综合校正射频通道不一致性、天线阵子安装误差、AD采样不一致性造成的通道相位不一致;可实时对卫星来向的通道误差进行校正。仿真证明,该方法具备较好的幅相误差抑制效果。

**关键词:** 自适应;阵列校正;抗干扰;卫星导航

**中图分类号:** TN973.3   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.8010

## An adaptive correction technique of array antenna based on carrier phase measurement

Zhao Jun Su Runjia

(State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of array correction in the anti-interference processing of satellite navigation array, an array antenna adaptive correction technology based on carrier phase measurement is adopted in this paper. Each array element of the array antenna is used to receive the same satellite signal, capture, track, observe and extract the carrier phase of each channel of the specified satellite, calculate the carrier phase difference, calculate the error between each channel, and correct the amplitude and phase inconsistency of the array antenna, so as to reduce the impact of amplitude and phase inconsistency on the performance of anti-jamming algorithm. Compared with the traditional array antenna adaptive correction algorithm, it has the following advantages: 1) it can be corrected separately for each satellite; 2) It can comprehensively correct the channel phase inconsistency caused by RF channel inconsistency, antenna array installation error and AD sampling inconsistency; 3) The channel error of the satellite can be corrected in real time. Simulation results show that this method has good amplitude and phase error suppression effect.

**Keywords:** adaptive; array correction; anti-jam; satellite navigation

## 0 引 言

自适应阵列处理抗干扰技术可对宽带、窄带等各种干扰类型进行有效抑制,是目前卫星导航抗干扰技术领域主要的抗干扰工作方式。自适应阵列抗干扰算法按照是否波束成形分为自适应调零<sup>[1-2]</sup>和自适应波束成形抗干扰,这两种算法在空域、空时域和空频域都包含多种变形算法,自适应调零算法最终仅在干扰方向形成零陷,自适应波束成形抗干扰算法在干扰方向形成零陷的同时,还可在卫星方

向形成增强波束,在抑制干扰的同时,对卫星信号进行增强,进一步提高抗干扰能力<sup>[3]</sup>。

由于自适应波束成形抗干扰算法需对卫星形成波束,因此该算法需要预知卫星来向的先验信息,利用该信息进行导向矢量估计。然而实际应用中,由于天线安装、射频通道以及互耦等都会对射频前端带来一定的幅相不确定性,使得卫星导向矢量失配,造成波束成形抗干扰算法能力下降<sup>[4-8]</sup>,不同卫星其通道不一致性也不一样,因此有必要对每个卫星进行实时校正。

收稿日期:2022-05-19

\* 基金项目:河北省省级科技计划项目(206Z0303G)资助

实际抗干扰装置中,存在大量的误差源,如天线单元安装误差、阵列方向图、射频组件幅相不一致性等,这些系统误差影响绝大多数抗干扰算法的性能。降低这些误差因素对抗干扰算法性能的影响主要包括阵列自校正、抗干扰处理后的修正技术和对误差不敏感的抗干扰处理算法。

其中常用的阵列校正方法主要为静态校正,在暗室或者标准测试场景进行抗干扰天线幅相不一致性测试,并进行校正,但是该方法在实际使用过程中,仅能对设备的法线方向进行校正,卫星信号以及干扰信号来自不同的方位和俯仰,单一的校正参数无法有效完成阵列全部方向的幅相校正,除了法线方向以外,其效果相对较差。

基于载波相位测量的阵列天线校正技术是利用阵列天线各个阵元分别接收同一颗可见卫星,每个通道分别对该卫星进行捕获、跟踪、原始观测量计算,获取各通道针对该卫星的载波相位值,进而计算不同阵列的载波相位误差,依次来计算阵列通道校正参数。

本文后续首先将分别研究空时二维抗干扰算法<sup>[9-10]</sup>在无阵列幅相误差和存在阵列误差条件下的常用自适应抗干扰处理算法对载波相位测量的影响进行分析研究,再进行基于载波相位的自适应阵列校正,最终给出仿真分析结果。

## 1 无幅相误差下的抗干扰稳健性分析

常用的卫星导航抗干扰算法包括自适应调零和自适应波束形成抗干扰。自适应调零多以 PI<sup>[11]</sup>算法为主,自适应波束形成多以 MVDR 算法为主,本文对讨论幅相误差对抗干扰算法的稳健性分析主要以 PI 算法和 MVDR 算法为主。

### 1.1 PI 算法

功率倒置算法(power inversion, PI)是目前卫星导航领域自适应调零算法中应用最多的算法,是典型的无约束算法,功率倒置迭代算法在抗干扰权值的计算过程,不需要卫星方位和载体姿态等先验信息。因此 PI 算法具有实现简单等优点,但相比 MVDR 算法等,其无法在卫星方向形成波束增益。

其基本原则为通过调整阵列各空时二维权矢量使阵列输出功率最小来计算最优的阵列加权矢量,其权值的约束方程为:

$$\begin{aligned} \min W^H R W \\ \text{s. t. } W^H \Phi = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\Phi = [1, 0, \dots, 0]^T$ ,  $R = E\{xx^H\}$ ,  $x$  为阵列抗干扰输入中频数据,  $R$  为阵列输入数据的协方差矩阵。其最优解为:

$$W = R^{-1} \Phi / \Phi^H R^{-1} \Phi \quad (2)$$

通过式(2)最优解所计算的阵列抗干扰输出为:

$$y = W^H x(t) \quad (3)$$

通过式(3)可知,功率倒置迭代算法抗干扰输出结果与阵列输入数据的协方差矩阵有关,随着干扰的增加或者环境噪声发生变化,功率倒置迭代算法的抗干扰输出结果都

会带来较大的相位跳变<sup>[12-14]</sup>,从而影响导航接收机的接收。

### 1.2 MVDR

MVDR 算法与 PI 算法不同,可在已知卫星来向和载体姿态条件下,对卫星方向进行正向波束增益,抑制干扰的同时增强卫星信号,进一步提高抗干扰能力。按照卫星约束数量分为单卫星单约束和多卫星多约束准则。以单卫星单波束为例, MVDR 算法的约束函数如式(4):

$$\begin{aligned} \min W^H R W \\ \text{s. t. } W^H a(\theta_i) = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)最优解为:

$$W = R^{-1} a(\theta_i) / a^H(\theta_i) R^{-1} a(\theta_i) \quad (5)$$

MVDR 算法的抗干扰输出结果为:

$$y = W^H x(t) = \beta_i s_i(t) + e_w(t) \quad (6)$$

MVDR 算法<sup>[15-17]</sup>在自适应形成零陷时,同时在卫星的方向进行正向增益约束,可保证 MVDR 抗干扰算法输出后对卫星信号的载波相位不发生变化,从而降低抗干扰算法对接收机精度的影响。

实际应用中,可通过 MEMS 等惯性器件实现载体姿态等估计,可通过星历、导航电文等获取卫星的方位角和俯仰角,通过坐标转换实现卫星坐标向载体坐标系的转换,实现卫星方向的约束,因此理想阵列条件下, MVDR 算法不引入载波相位偏差。

## 2 幅相不一致下的抗干扰稳健性分析

本节主要讨论 PI 算法和 MVDR 算法在阵列存在幅相不一致时,两种算法的稳健性。抗干扰阵列天线存在幅相不一致时,信号模型如式(7):

$$\tilde{x}(t) = \sum_{m=1}^M \tilde{a}(\theta_m) s_m(t) + \sum_{n=1}^N \tilde{a}(\theta_n) j_n(t) + n(t) \quad (7)$$

式(7)中  $\tilde{a}(\theta_m)$  为阵列在幅相不一致下的导向矢量。可定义为:

$$\begin{aligned} \Delta = & [(1 + \sigma_1) e^{-j\chi_1} e^{-j\omega \delta_1} \left(-\frac{M}{2}\right) \sin\theta, \\ & (1 + \sigma_2) e^{-j\chi_2} e^{-j\omega \delta_2} \left(-\frac{M}{2} + 1\right) \sin, \\ & \dots + \sigma_M) e^{-j\chi_M} e^{-j\omega \delta_M} \left(\frac{M}{2} - 1\right) \sin\theta]^T \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M$  表示幅度误差,  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_M$  表示相位误差,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M$  表示阵列天线各阵元位置绝对误差。令:

$$\Lambda = \text{diag}(\Delta) \quad (9)$$

幅相不一致性下的阵列天线接收数据的协方差矩阵表示为  $\tilde{R}$ 。功率倒置迭代算法的最优权矢量为:

$$\tilde{w} = \tilde{R}^{-1} \delta / \delta^H \tilde{R}^{-1} \delta - 1 \Phi \quad (10)$$

存在幅相误差下的 PI 算法抗干扰输出为:

$$\tilde{y} = \tilde{w}_{PI}^H \tilde{x}(t) = \tilde{\mu}_i s_i(t) + e_w(t) \quad (11)$$

式中:

$$\tilde{\mu}_i = \frac{\delta^H \mathbf{R}^H}{\delta^H \mathbf{R}^{-1} \delta} \tilde{\mathbf{a}}(\theta_i) \quad (12)$$

由式(12)可知,阵列天线存在幅相不一致时,功率倒置迭代算法对卫星信号的权值为复常数,则接收机载波相位测量值也存在一个固定相位差,即阵列幅相不一致性会导致抗干扰处理后存在一固定的载波相位差。

同理,阵列天线存在幅相不一致时,MVDR 算法的加权矢量为:

$$\tilde{\mathbf{w}}_{MVDR} = \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_i) / \mathbf{a}^H(\theta_i) \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_i) \quad (13)$$

式(13)中,

$$\beta_i = \left[ \frac{\tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_i)}{\mathbf{a}^H(\theta_i) \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_i)} \right]^H \tilde{\mathbf{a}}(\theta_i) \quad (14)$$

由式(14)可知,阵列幅相不一致时,MVDR 算法的载波相位测量误差随时间变化,不是一个固定值。

通过第 1 节和第 2 节分析可得:

1)理想阵列条件下,功率倒置迭代算法抗干扰输出存在一定的载波相位测量误差;MVDR 算法由于导向矢量的正向约束,抗干扰处理不会产生载波相位测量误差。

2)实际阵列天线中,或多或少存在幅相误差,因此 PI 算法和 MVDR 算法抗干扰输出都会使得接收机段的载波相位测量产生误差,功率倒置迭代算法的抗干扰处理将会引入一个固定误差,MVDR 算法的抗干扰处理则引入一个随机误差。

### 3 基于载波相位测量的阵列天线自适应校正技术

为解决自适应抗干扰算法过程中的天线幅相校正问题,本文提出一种基于载波相位测量的阵列天线自适应校正实现方法,其处理框图如图 1 所示,自适应校正过程具体实现步骤如下:

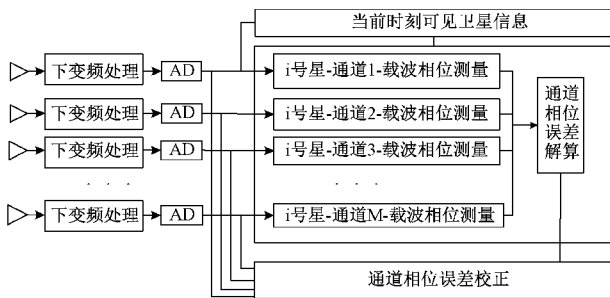


图 1 基于载波相位测量自适应校正框图

步骤 1)将阵列天线接收到的 M 路模拟射频卫星信号进行下变频到中频,并进行 A/D 量化,得到 M 路中频数字信号;

步骤 2)使用第一路中频数字卫星信号进行当前可见卫星搜索,解算星历,获得当前时刻所有可见卫星信息,并计算所有可见卫星的方位角和俯仰角;

步骤 3)针对每个可见卫星,M 个阵元同时进行该卫星的捕获和跟踪,解算出每个阵元通道中该指定卫星的载波

相位;并计算 M 路载波相位相对于第一个阵元通道的载波相位误差,求取载波相位校正参数,对 M 路卫星信号进行通道误差校正;

步骤 4)对校正后的卫星信号进行自适应波束形成抗干扰处理,进行干扰抑制的同时,增强卫星信号。

其中,步骤 3)自适应校正的处理流程如图 2 所示。

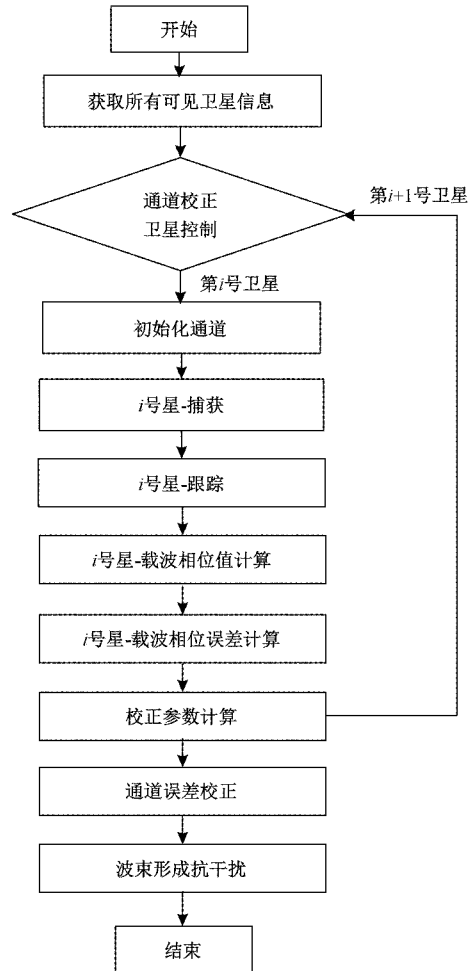


图 2 自适应校正处理流程

步骤 1)初始化通道信息:重置 M 个卫星接收通道,初始化其捕获、跟踪和载波相位测量值;

步骤 2)针对指定卫星信号进行捕获:根据给定的卫星 PRN 编号,利用本地捕获环路,进行本地伪码的滑动相关,计算最大相关值,进行载波相位和伪码相位粗略估计;

步骤 3)针对指定卫星进行跟踪:动态调整接收机的捕获跟踪环路参数,对指定卫星进行载波相位和码相位的精确跟踪,获得载波相位测量值;

步骤 4)计算各通道间的相位误差和校正参数:依据载波相位测量值计算载波相位误差,直接求取阵列天线的载波相位校正参数,并对通道进行校正;

其中,各通道的载波相位测量值为:  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_n$ ; 载波相位误差为:

$$\Delta_0 = \varphi_0 - \varphi_0 = 0^\circ$$

$$\Delta_1 = \varphi_1 - \varphi_0$$

$$\Delta_2 = \varphi_2 - \varphi_0$$

...

$$\Delta_n = \varphi_n - \varphi_0$$

取载波相位校正参数为:

$$\alpha_0 = 1$$

$$\alpha_1 = e^{j \cdot \Delta_1}$$

$$\alpha_2 = e^{j \cdot \Delta_2}$$

...

$$\alpha_n = e^{j \cdot \Delta_n}$$

步骤 5) 返回步骤 1), 对新的指定卫星进行通道误差校正, 直至完成所有可见卫星的校正;

步骤 6) 设定时间后, 重复自适应校正步骤 1)~步骤 5) 重新对所有可见卫星进行校正。

## 4 仿真分析

### 4.1 阵列幅相等误差对空时抗干扰性能的影响

仿真条件: 本文利用卫星导航四阵元抗干扰天线进行性能仿真, 阵元间距为  $0.5\lambda$ , 阵元位置误差  $\Delta x$  和  $\Delta y$  均匀分布, 干扰位置为  $(50^\circ, 220^\circ)$ , 图 3 和 4 分别为存在阵列幅相不一致性下的阵列天线接收数据的幅度和相位差异。

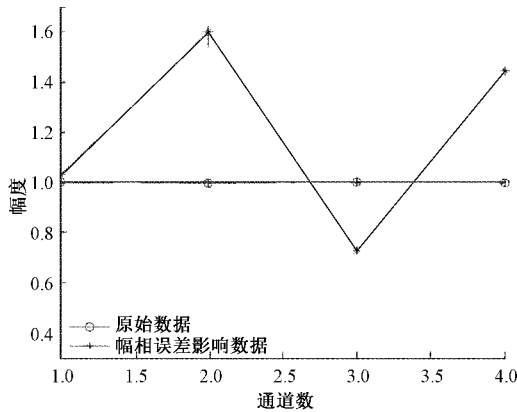


图 3 接收数据幅度受幅相不一致影响情况

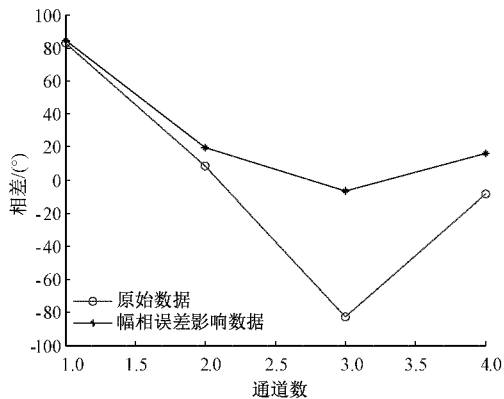


图 4 接收数据相位受幅相不一致影响情况

仿真分析: 在空时二维抗干扰处理过程中, 当不存在系统幅相误差时, 阵列天线各阵元接收信号的幅度不随信号入射角度变化, 相位差值与入射角度相关, 相差一波程差。图 3 和 4 接收数据受幅相不一致影响情况进一步说明了该问题。但是, 当存在系统幅相误差等影响时, 所接收信号的幅度和相位均发生了严重的变化。这将进一步引起抗干扰天线方向图及算法干扰抑制能力的降低, 如图 5 所示。

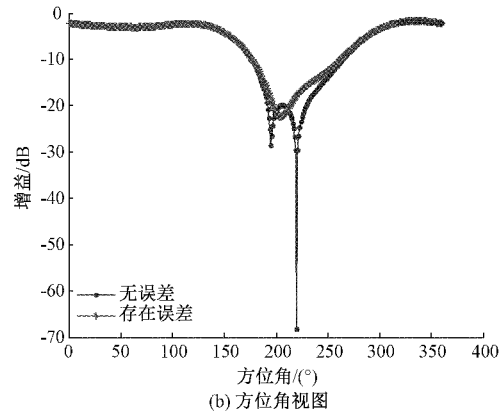
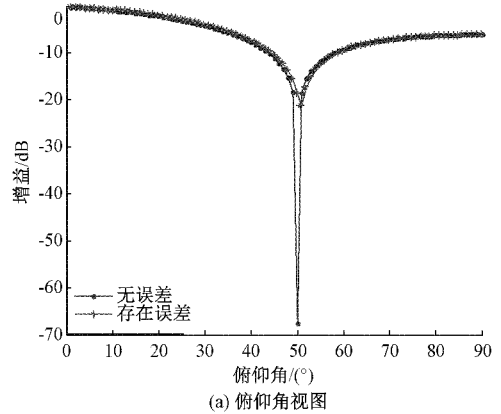


图 5 抗干扰性能受幅相不一致影响情况

由图 5 仿真结果可知, 幅相不一致对抗干扰算法方向图的零陷深度存在明显的影响。

幅相不一致性会使抗干扰天线输出方向图的零陷深度减小, 零陷宽度变宽, 算法无法对干扰进行抑制。造成这一影响的原因为, 当单个干扰入射进入阵列天线时, 阵列天线识别到的已经不是单一的独立干扰源, 而是根据受幅相不一致影响造成的各阵元响应, 单个干扰对于抗干扰阵列天线而言, 变为干扰方向周围的多个零散干扰, 因此抗干扰处理的结果为对干扰方向的多个虚拟干扰形成零陷, 所以在干扰方向周围形成较宽的零陷, 同时零陷深度进一步降低。因此在存在阵列幅相不一致情况下, 抗干扰算法的方向图变宽, 深度变低。

### 4.2 自适应校正对抗干扰算法的影响

仿真条件: 同 4.1 节, 本节分别对文中基于载波相位测量的自适应校正技术和常规校正技术, 进行仿真对比, 下图为阵列自适应未校正、常规校正方法和本论文校正方法后对

抗干扰天线处理效果的对比,其中  $X$  轴与  $Y$  轴为扫描角度。

由图 6、7 可以看出,约束方向与干扰来向存在一定角度间隔时,阵列天线不存在幅相误差情况下的输出 SINR 约为  $-35$  dB,同时该值不随角度变化而变化;当基于本文算法进行幅相误差校正后,阵列天线抗干扰输出 SINR 随着角度的变化出现了一定程度的下降,同未进行幅相校正的抗干扰处理相比,存在大约为  $4$  dB 的降幅;传统校正方法输出的 SINR 与不存在幅相误差时相比也有同样的现象,但其输出的 SINR 比本文算法存在  $2$  dB 的降幅,导致这一差异的主要原因为,本文算法可实时对阵列天线的不同角度进行校正,而传统方法仅对单一方法的校正效果较好,本文校正方法处理后对干扰的抑制效果优于传统的方法,并且相比传统方法,接收的相关峰畸变也会更小。当信号方向同干扰方向相差角度不大时,三种条件下的输出 SINR 均发生明显下降。因此,本文的幅相校正算法对输出信噪比具有明显的改善,但由于幅相校正对引入了部分随机噪声,导致抗干扰算法的输出 SINR 下降。

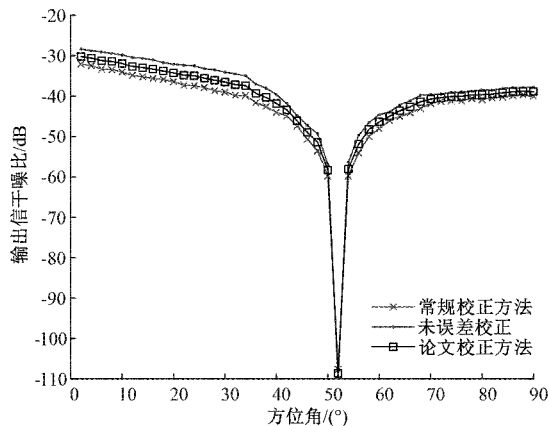


图 6 幅相校正对阵列输出信噪比的影响

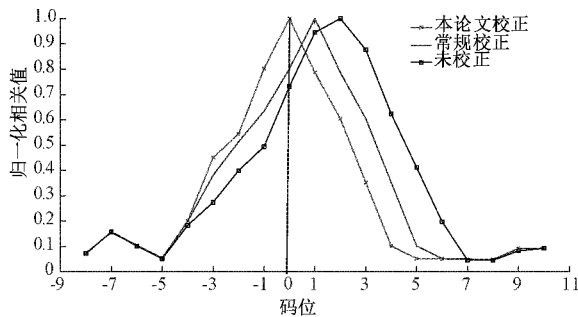


图 7 幅相校正对接收机捕获跟踪影响

## 5 结 论

针对阵列天线自适应波束形成抗干扰中存在的幅相不一致校正问题,本文首先对 PI、MVDR 等抗干扰算法在无幅相误差和存在幅相误差条件下的抗干扰稳健性进行分析,分析各算法对抗干扰处理和接收的性能影响,随后提出

一种基于载波相位测量的阵列天线自适应校正实现方法,并开展了仿真对比分析。结果表明,经过算法校正后,在不影响抗干扰零陷深度等的情况下,本文算法相比传统方法具有更好的抑制效果,并且可带来较小的信号畸变和较大的 SINR。

## 参考文献

- [1] 王雨,林浩冬,李成,等. 基于 PI 算法的自适应天线阵仿真研究[J]. 现代计算机,2021(2):14-17,33.
- [2] 李成城,李鹏程. 卫星导航自适应调零天线抗干扰技术[J]. 电子信息对抗技术,2020,35(6):59-63.
- [3] 何楠. 基于 MATLAB 仿真的 LMS 和 LCMV 算法抗干扰性能比较研究[J]. 电子测量技术,2010,33(9):29-32.
- [4] 方贝贝. 卫星导航调零天线相位中心校正方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [5] 袁自月,牛一鸣,杨国,等. 一种阵列天线阵元幅相、位置误差校正方法[J]. 电子与信息学报,2014,36(9), DOI:10.3724/SP.J.1146.2013.01807.
- [6] WAX M, ADLER A. Direction of arrival estimation in the presence of model errors by signal subspace matching[J]. Signal Processing, 2021, DOI:10.1016/j.sigpro.2020.107900.
- [7] 梁涛,杨波,朱敏,等. 基于波束形成的均匀方阵虚拟基元定位方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2):266-274.
- [8] COMPTON R T. The bandwidth performance of a two-element adaptive array with tapped delay-line processing[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2002, 36(1):5-14.
- [9] MOORE T D. Analytic study of space-time and space-frequency adaptive processing for radio frequency interference suppression [D]. Columbus: The Ohio State University, 2002.
- [10] MCGRAW G A, MCDOWELL C, YOUNG R S Y, et al. Assessment of GPS anti-jam system pseudorange and carrier phase measurement error effects [C]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2005: 603-617.
- [11] FANTE R L, FITZGIBBONS M P, MCDONALD K F. Effect of adaptive array processing on GPS signal crosscorrelation [C]. Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004), 2004: 579-583.
- [12] 朱江森,高秀娜,黄艳,等. GNSS 接收机抗干扰性能关键指标测试方法的研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):135-141.
- [13] XU H L, CUI X W, LU M Q. Adaptive blind nulling without measurement biases in GNSS receivers[C].

- IEEE International Conference on Communication Technology, 2017:1074-1078.
- [14] 陶震. 基于导向矢量失配估计的鲁棒波束域自适应波束形成算法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(7): 23-26, 42.
- [15] 赵辰乾, 刘益辰, 刘欣. 有色噪声下 GNSS 空时抗干扰算法的性能分析和改进[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1388-1394.
- [16] 周毅, 雷志勇, 李品. 一种改进的 MVDR 空间谱估计算法[J]. 现代雷达, 2021, 43(10): 47-51.
- [17] 董晋, 胡鹏, 冯金鹿. 双约束条件的时域 MVDR 自适应波束形成方法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 127-130.

#### 作者简介

赵军(通信作者), 硕士, 中级工程师, 主要从事卫星导航干扰与抗干扰等方面的研究。

E-mail: woxgs@163.com