

# 一种 GPS 抗干扰及干扰 DOA 估计工程集成方法

李江渠<sup>1</sup>, 高立朝<sup>2</sup>

(1 火箭军装备部驻北京地区第二军事代表室 北京 100076

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 卫星导航干扰对消技术和干扰测向技术是卫星导航干扰对抗的两个典型方向, 并逐渐成为当前卫星导航抗干扰装备的标配功能。如何实现干扰对消和干扰测向的高效集成成为制约工程实现的主要瓶颈之一。提出一种 GPS 抗干扰及 DOA 估计的工程集成方法, 通过优化噪声子空间估计工程实现, 实现了高性能抗干扰和高精度干扰测向的高效集成, 与抗干扰模块和干扰测向模块相比, 集成模块极大降低了工程实现资源。测试结果表明该方法可以有效对抗干信比 60dB 的干扰, 并提供 2 度的测向精度。

**关键词:** SAP; DOA; SMI; GPS

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)05-0023-06

## An implementation method of anti-jam and jam DOA in GPS

LI Jiangqu, GAO Lichao

(1. The Second Military Representative Office in Beijing, Rocket Force Equipment Department, Beijing 100076, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Interference cancellation technology and interference direction finding technology are two typical directions of satellite navigation interference countermeasure, and gradually become the standard function of current satellite navigation equipment. How to realize the efficient integration of interference cancellation and interference direction finding becomes one of the main bottlenecks of engineering application. In this paper, an engineering integration method of GPS anti-jamming and DOA estimation is proposed. By optimizing the noise subspace estimation, the method realizes the efficient integration of high-performance anti-jamming and high-precision interference direction finding. Compared with the anti-jamming module and interference direction finding module, the integration module greatly reduces the engineering resources. The test results show that the method can effectively resist the interference of interference signal ratio 60 dB and provide 2-degree direction finding accuracy.

**Key words:** SAP; DOA; SMI; GPS

## 引 言

全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 可以为全球用户提供全天时、全天候的定位服务, 在交通运输、抢险救灾等方面均起到重要作用。北斗导航系统是我国自主建设的全球定位系统, 已于 2018 年 12 月 27 日建成基本系统, 并向“一带一路”沿线国家和地区开通服务, “北斗三号”系统自 2020 年开始向全球用户提供服务。

然而, 卫星导航系统由于信号功率微弱, 标称值为 $-133\text{dBm}$ , 在环境热噪声以下 30dB, 极易受到外界电磁信号影响, 导致定位误差增大甚至无法正常定位。在城市等电磁复杂的环境下, 为提供稳定可靠的卫星导航定位服务, 卫星导航设备应该具备干扰对消能力, 同时, 也应该具备干扰检测能力才能在干扰导致的卫星导航性能下降时, 可以及时有效地确定性能下降原因, 排查干扰位置, 消除干扰影响<sup>[1]</sup>。

空域自适应处理 SAP (Space Adaptive Processing) 是阵列信号处理中常用的干扰对消技术, 已经

在卫星导航干扰对抗方向有成熟的工程化应用。信号来向估计 DOA (Direction of Arrival) 是阵列信号处理的主要应用方向之一, 也已经具备成熟的工程化实现能力<sup>[2]</sup>。

然而, 同时具备 SAP 和 DOA 功能的设备在工程化应用上尚未有成熟产品。限制集成 SAP 和 DOA 工程化的瓶颈之一是如何设计低成本高性能的工程实现。

本文基于阵列信号处理原理, 通过直接矩阵求逆模块 SMI (Strictly Matrix Inverse) 复用优化噪声子空间估计, 极大降低了集成 SAP 和 DOA 功能的工程化成本。

## 1 SAP、DOA 集成原理与分析

以工程常见的 4 阵元圆形阵为例进行 SAP、DOA 集成原理分析。4 阵元天线阵列采集空间电磁信号  $s$ , 得到空间阵列信号  $s$ , 假设空间中存在  $I$  个电磁信号, 则阵列信号可写为

$$s = \sum_{i=1}^I \mathbf{D}(\theta_i) s_i + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{D}(\theta_i)$  是第  $i$  个电磁信号  $s_i$  自来向角  $\theta_i$  对应的导向矢量,  $\mathbf{n}$  为热噪声。

定义协方差矩阵  $\mathbf{R} = \mathbf{s}\mathbf{s}^H$ , 则协方差矩阵  $\mathbf{R}_s$  的各个特征矢量组成了当前信号的信号空间。通过特征值分解, 可以按照信号能量大小分解信号空间。由于卫星信号能量远低于噪声能量, 同时干扰信号能量通常高于噪声能量。因此通过能量可以将干扰信号子空间从信号空间中剥离, 得到干扰信号子矩阵。干扰信号子矩阵的逆矩阵则构成了干扰信号的正交子空间, 又称为噪声子空间。正交子空间中的任意特征矢量都与干扰子空间正交, 对应的干扰信号在正交子空间的投影为 0。因此, 通过对干扰子空间求逆, 可以得到滤除干扰信号所需的空域抗干扰权值。这种实现 SAP 的算法称为 SMI 算法<sup>[3]</sup>。

在工程实现上, 可以使用协方差矩阵作为干扰子矩阵的估计, 从而降低工程资源消耗。此时, SAP 抗干扰权值的计算公式可写为

$$\mathbf{W} = \text{inv}(\mathbf{R}_s) \mathbf{C} \quad (2)$$

其中,  $\text{inv}(\mathbf{R}_s)$  为协方差矩阵求逆运算,  $\mathbf{C}$  为全 1 列矢量。

由于噪声子空间与干扰信号正交, 干扰信号的导向矢量在噪声子空间上的投影为 0。因此, 可以通过遍历空间所有导向矢量在噪声子空间上的投影实现干扰来向估计。这种实现 DOA 的算法称为 MUSIC 算法<sup>[4]</sup>。

同样在工程实现上, 可以使用协方差矩阵作为干扰子矩阵的估计, 从而降低工程资源消耗。此时, DOA 估计的空间谱计算公式可写为

$$\theta = \arg \min_{\mathbf{D}(\theta)} (\text{inv}(\mathbf{R}_s) \mathbf{D}(\theta)) \quad (3)$$

由于逆矩阵的任一特征矢量均与干扰子空间正交, 同时由求解特征矢量原理可知,  $\text{inv}(\mathbf{R}_s)$  的第 1 列元素组成的列矢量是该逆矩阵的特征矢量。定义  $\text{inv}(\mathbf{R}_s)$  的第 1 列元素组成的列矢量为  $\mathbf{V}$ , 则 SAP 和 DOA 的工程实现可以简化为

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \mathbf{V} \\ \theta &= \arg \min_{\mathbf{D}(\theta)} (\mathbf{V} \mathbf{D}(\theta)) \end{aligned} \quad (4)$$

可以发现, 实现 SAP 和实现 DOA 算法的主要资源消耗均是通过矩阵求逆解算  $\mathbf{V}$ 。因此, 通过合理设计复用矩阵求逆模块, 可以降低集成所需的工程资源。

4 阵元天线阵的协方差矩阵可以写为

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

V 满足公式:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{bmatrix} \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于等比例放大或者缩小 V, 不影响工程实现性能。定义:

$$\begin{aligned} R_{32}^1 &= R_{32}R_{21} - R_{22}R_{31} & R_{42}^1 &= R_{42}R_{21} - R_{22}R_{41} & R_{42}^2 &= R_{42}^1R_{32}^1 - R_{32}^1R_{42}^1 \\ R_{33}^1 &= R_{33}R_{21} - R_{23}R_{31} & R_{43}^1 &= R_{43}R_{21} - R_{23}R_{41} & R_{43}^2 &= R_{43}^1R_{32}^1 - R_{33}^1R_{42}^1 \\ R_{34}^1 &= R_{34}R_{21} - R_{24}R_{31} & R_{44}^1 &= R_{44}R_{21} - R_{24}R_{41} & R_{44}^2 &= R_{44}^1R_{32}^1 - R_{34}^1R_{42}^1 \end{aligned}$$

公式 (6) 可以改写为

$$\begin{bmatrix} R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ 0 & R_{32}^1 & R_{33}^1 & R_{34}^1 \\ 0 & 0 & R_{43}^2 & R_{44}^2 \end{bmatrix} \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时, 通过求解公式 (7), 可以解算得出向量 V。分析公式 (6) 到公式 (7) 的变换过程, 可以设计模块组成矩阵求逆流水:

$$T(n+1) = T(n)a(n) - b(n)c(n) \quad (8)$$

例如:  $R_{42}(n+1) = R_{42}(n)a(n) - b(n)c(n)$ , 其中,  $a(n) = R_{21}(n)$ ,  $b(n) = R_{22}(n)$ ,  $c(n) = R_{31}(n)$ ,  $(n+1) = R_{32}(n+1)$ ,  $b(n+1) = R_{23}(n+1)$ ,  $c(n+1) = R_{42}(n+1)$ 。

对应工程实现流程图如图 1 所示。

### 2 SAP、DOA 集成实现与测试

选择基于 Xilinx 7z-100 的原型验证平台进行集成实现与测试, Xilinx 7z-100 的原型验证平台如图 2 所示。

原型验证平台包括两片 Xilinx 7z-100, 一片用于抗干扰处理, 另一片是用于卫星导航解算定位。

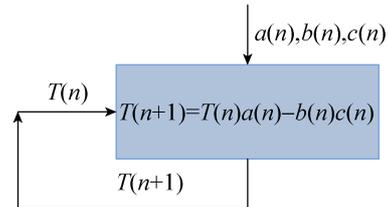


图 1 工程实现流程图

Fig. 1 Engineering implementation flow chart



图 2 原理样机实体图

Fig. 2 Diagram of principle prototype

硬件主要包括电源模块和数字信号处理模块两部分。4 路射频信号经过模拟下变频、滤波以及 AD 采样进入 Xilinx 7z-100 芯片, 在芯片内完成干扰对消和干扰测向。

数字信号处理模块主要包括 SMI 计算模块、抗干扰加权对消模块和干扰测向模块。其中, SMI 计算模块如图 3 所示。

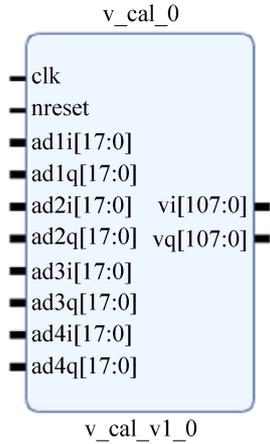


图 3 SMI 计算模块

Fig. 3 SMI calculate module

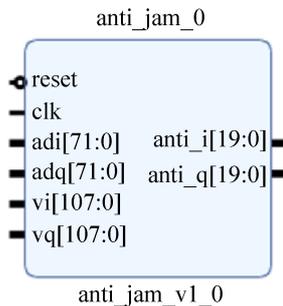


图 4 抗干扰对消处理模块

Fig. 4 SAP antijam module

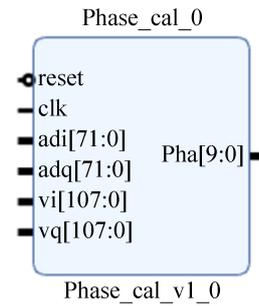


图 5 干扰测向模块

Fig. 5 Jammer DOA estimation module

该模块输入为 4 路阵列 IQ 信号, 输出为特征矢量  $V$ 。抗干扰加权对消模块如图 4 所示。

该模块输入为 4 路阵列 IQ 信号和特征矢量  $V$ , 输出为 1 路干扰对消输出 IQ 信号。输出信号通过片间互联线进入导航解算芯片, 完成导航定位。干扰测向模块输入为特征矢量  $V$ , 输出为干扰来向。干扰来向信息通过串口完成对外传递。干扰测向模块内使用 ROM 存储全空间导向矢量。干扰测向模块如图 5 所示。

集成资源消耗与单 SAP、单 DOA 模块资源消耗如表 1 所示。

由表 1 可知, 通过合理设计 SMI 模块, SAP 与 DOA 集成只需在 SAP 或 DOA 上增加少量资源即可同时实现 SAP 和 DOA 功能, 可以极大降低 SAP、DOA 集成所需的硬件资源, 实现低成本工程化。

在测试平台进行了干扰对消及干扰测向性能测试, 测试平台如图 6 所示。原型样机固定安装在高精度转台, 使用干扰控制系统生成干扰信号。原型样机通过串口对外传递导航定位结果和干扰测向结果。干扰控制系统监控上位机如图 7 所示。

表 1 资源消耗

Table 1 Resource require

	Slice LUTs	Slice Registers	Block Memory Tile	DSP
SAP	61226	47065	0	364
DOA	79210	85571	12	384
SAP&DOA 集成	79754	86511	12	400



图 6 测试平台

Fig. 6 Test platform

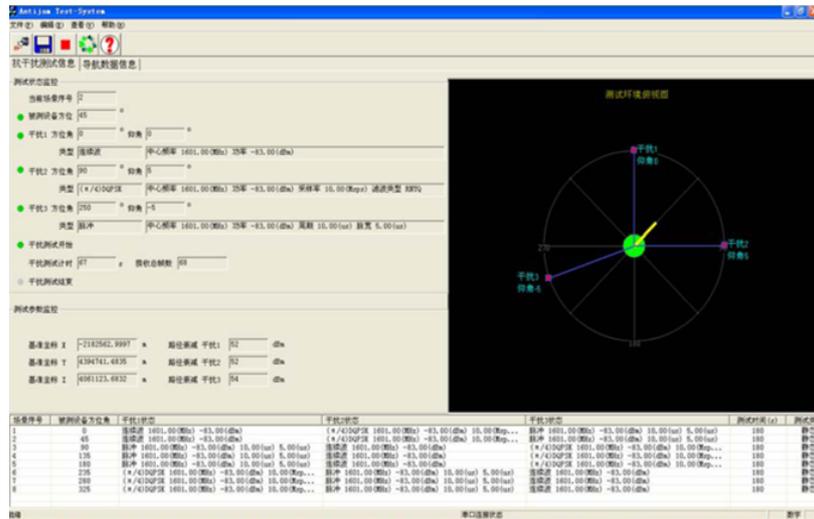


图7 干扰控制系统监控上位机界面

Fig. 7 Interference control system monitoring interface

当干扰信号为 1268.52MHz 单频干扰, 干信比 JSR (Interference to Signal Ratio) 为 60dB 时, 原型样机收星定位结果如图 8、图 9 所示。

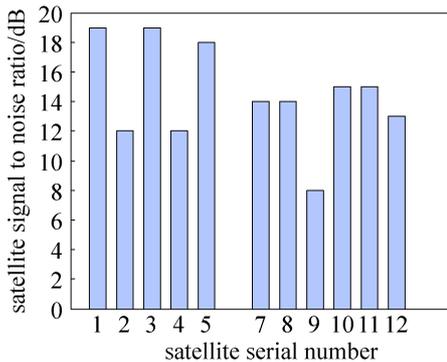


图8 干信比 60dB, 收星信噪比

Fig. 8 JSR 60dB, satellites received SNR

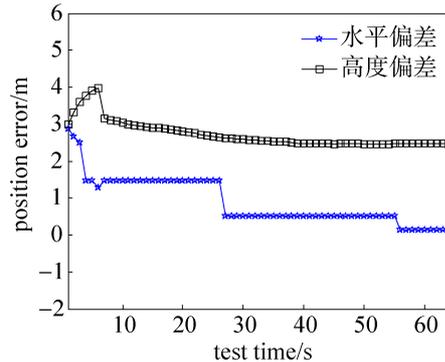


图9 干信比 60dB, 定位误差

Fig. 9 JSR 60dB, position error

保持干扰信号频率、功率不变, 不断改变干扰来向, 干扰测向性能如图 10、图 11 所示。

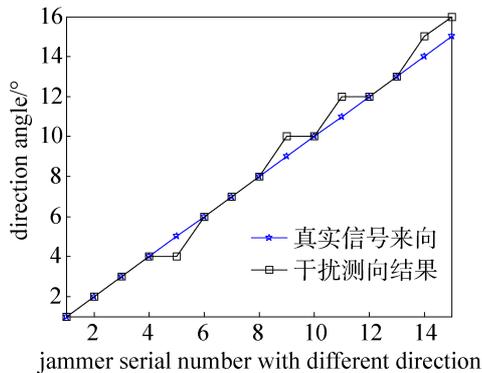


图10 干扰测向结果

Fig. 10 DOA of jammer

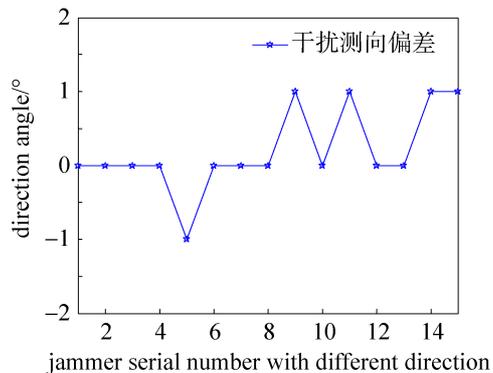


图11 干扰测向误差

Fig. 11 DOA error of jammer

测试结果表明, 干扰信号干信比为 60dB 时, 原型样机可以在有效滤除干扰的同时得到精度优于 2° 的干扰测向结果。实测结果表明, 采用本文提出的集成方法, 可以实现高性能低需求的 SAP、DOA

集成工程化。

### 3 结束语

干扰对消与干扰测向是干扰对抗技术中的一对盾与矛。面对日益复杂的电磁环境,全面提升卫星导航接收机的抗干扰能力是抗干扰发展的方向。在有效对抗干扰的同时,实时识别环境干扰,及时进行干扰预警是推广卫星导航广泛应用的有力保障。

针对这一实际需求,本文提出一种干扰对消和干扰测向的集成方法,在保障高性能抗干扰和干扰测向的同时,极大地降低了工程资源需求。实测结果表明,采用 SMI 模块复用的原型样机使用低硬件资源可实现干信比 60dB 干扰的有效滤除,同时提供精度优于 2° 的侧向性能。

### 参考文献

- [1] HARRISON M, KENAGY R, LILLY R, et al. Alternative positioning, navigation, and timing (APNT) services research development program[C]. Proc. ION GNSS, 2010.
- [2] KRIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67–94.
- [3] MELVIN W L. A stap overview[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004, 19: 19–35.
- [4] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34: 276–280.

#### [作者简介]

李江渠 1976 年生, 工程师, 硕士, 研究方向为卫星导航与定位。

高立朝 1988 年生, 工程师, 硕士, 研究方向为卫星导航与定位。

---

#### (上接第 5 页)

- [3] SAMBASIVARAO K, JAHAGIRDAR D R, BHATTA R K. High performance choked feed horn for compact antenna test range reflector[C]. 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications, 2017: 24–26.
- [4] YANG X, ZHOU Y. 12 to 40 GHz quad-ridged horn antenna design and optimization[C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2019: 20–22.
- [5] 董宾, 韩金林, 沈泉, 等. 一种性能改进了的大张角四脊型超宽带馈源的研制[J]. 电子与信息学报, 2014, (10): 2509–2514.  
DONG Bin, HAN Jinlin, SHEN Quan, et al. Improved design for enhanced performance of a large-subtended-angle quadruple-ridged ultra-wideband feed[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, (10): 2509–2514.
- [6] 刘宁民, 邓晖. 基于平衡馈电技术双极化天线馈电结构的设计[J]. 遥测遥控, 2008, 29(2): 26–29.  
LIU Ningmin, DENG Hui. Feed part design based on the balanced feed technique for dual-polarized antennas[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2008, 29(2): 26–29.
- [7] ZHAO Z, WANG Z. A balanced feed quad-ridged horn antenna[C]. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation, 2019.
- [8] FOGED L J, GIACOMINI A, MORBIDINI R, et al. Wideband field probes for advanced measurement applications[C]. 2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, 2011.
- [9] NI Z, SHI H, ZHANG T, et al. A ku-band dual polarized corrugated horn[C]. 2018 International Conference on Electronics Technology, 2018.

#### [作者简介]

张雪 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为紧缩场馈源等。

王正鹏 1981 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信中的天线技术, 超宽带天线, 滤波天线, 紧缩场馈源等。