

文章编号: 2095-4980(2024)03-0285-05

空频抗干扰对 GNSS 载波相位测量的影响

张 伟¹, 彭梓洋², 马竞羽¹, 贺智勇¹

(1. 河南省科学院 应用物理研究所有限公司, 河南 郑州 450008; 2. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710129)

摘 要: 对于全球导航卫星系统(GNSS)的抗干扰, 最有效的是采用自适应天线阵技术, 但这种抗干扰处理会引入与信号入射方向相关的载波相位测量偏差, 限制了其在高精度测量领域的应用。为减小抗干扰处理的偏差, 引入测量偏差及其分析方法, 建立仿真模型, 并搭建软件接收机进行实验。结果表明, 在不增加额外约束的条件下, 采用空频最小方差无畸变响应算法实现空频抗干扰处理器, 不会引入载波相位测量偏差, 非常适用于对抗干扰性能和测量精确度均有苛刻要求的场合。

关键词: 全球导航卫星系统; 抗干扰; 空频自适应处理; 载波相位

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023249

Effect of space-frequency adaptive processing on carrier phase measurements of Global Navigation Satellite Systems

ZHANG Wei¹, PENG Ziyang², MA Jingyu¹, HE Zhiyong¹

(1. Henan Academy of Sciences Institute of Applied Physics Co., Ltd, Zhengzhou Henan 450008, China;
2. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: Adaptive antenna array technology is the most effective method for anti-interference of Global Navigation Satellite Systems(GNSS). However, this anti-interference processing generates carrier phase measurement bias related to the direction of signal incidence, which limits the effective application in high-precision measurement. In order to reduce the bias of anti-interference processing, an analysis method of introducing measurement bias is proposed, a corresponding model is established, and a software receiver is built for simulation experiments. The results show that without adding additional constraints, adopting the space frequency minimum variance distortionless response algorithm to achieve a space frequency anti-interference processor would not introduce carrier phase measurement bias, making it very suitable for applications in fields with strict requirements on anti-interference performance and measurement accuracy.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems; jammer; space frequency adaptive processing; carrier phase

阵列抗干扰技术在全球导航卫星系统(GNSS)抗干扰接收机中得到了广泛应用^[1-3], 这种接收机包括阵列天线、多通道射频前端、A/D转换器、抗干扰处理器以及后端的卫星信号接收处理器等。阵列抗干扰处理器可分为空域、空时和空频等类型: 空域抗干扰处理是利用卫星信号与干扰信号入射方向的差异, 通过对各天线阵元接收的信号进行加权求和, 调整阵列天线的方向图, 使“零陷”对准干扰方向实现干扰抑制; 空时抗干扰处理器在每个阵元通道后面加入一个时域滤波器, 从时域和空域两个维度联合对干扰进行抑制, 提高了干扰抑制尤其是宽带干扰抑制能力, 但实现复杂度也大大增加; 空频抗干扰处理是空时抗干扰处理的次优方案^[4], 通过将时域数据快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)到频域, 并在频域完成抗干扰处理, 然后频域数据通过逆变换再转换到时域。在频域进行抗干扰处理的优势是可以分别针对每个频点进行独立处理, 将空时抗干扰处理的 $MN \times MN$ 维(N 为阵元数, M 为时域抽头数)矩阵运算降至 $N \times N$ 维, 从而极大地降低实现复杂度。文献[5]的研究结

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(212102210570); 河南省科学院基本科研项目资助(230607062)

果表明, 128 点 FFT 的空频抗干扰处理器与 9 阶空时抗干扰处理器的实现复杂度相当。阵列抗干扰会引入与信号入射方向相关的载波相位测量偏差, 导致载波相位整周模糊度固定失败, 限制了阵列抗干扰技术在高精度测量领域的应用。文献[6]的研究结果表明, 包括阵列天线和多通道射频前端等硬件的非理想特性以及阵列抗干扰处理器本身都可能引入测量偏差。为减小甚至消除阵列抗干扰引入的测量偏差, 对硬件非理想特性进行校正并设计无偏的阵列抗干扰处理器是一种可行的方案^[6]。已有大量文献对空时抗干扰处理器引入的偏差进行了分析^[7-8], 并对空时抗干扰算法进行了无偏约束下的改进和优化^[9-11]。而对于空频抗干扰的研究, 实际应用中, 硬件非理想特性的校正可以利用空频抗干扰处理本身的 FFT 及其逆变换模块, 并将校正权值体现在空频抗干扰权值中, 这将进一步降低复杂度。因此, 本文重点研究空频抗干扰处理器本身对载波相位测量的影响。首先建立空频抗干扰处理模型, 引入测量偏差的分析方法; 然后搭建软件接收机进行仿真实验, 并对实验结果进行深入分析。实验结果证明了此方法的实用性。

1 空频抗干扰处理模型

空频抗干扰接收机的结构见图 1, 不失一般性, 设阵列天线的阵元数为 N , 每次进行 FFT 的数据块长度为 K , 则阵元 n 接收到的第 m 个数据块经加窗和 FFT 运算后可表示为:

$$X_n(k, m) = \sum_{l=1}^K w_l x_{nl}(m) e^{-j\frac{2\pi}{K}(l-1)(k-1)}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (1)$$

式中: $x_{nl}(m)$ 为阵元 n 接收到的第 m 个数据块的第 l 个元素, $l=1, 2, \dots, K$, $n=1, 2, \dots, N$; w_l 为窗函数; k 为 FFT 的第 k 个频点。

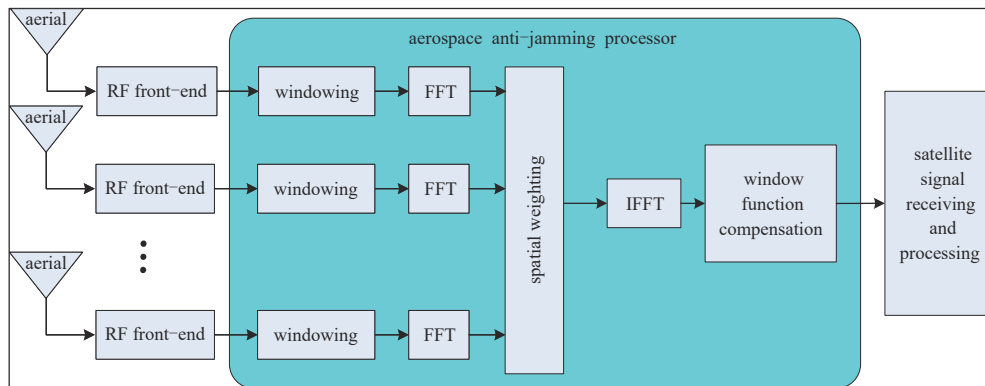


Fig.1 Structure diagram of the space frequency anti-interference receiver
图 1 空频抗干扰接收机结构图

图 1 中方框的部分为空频抗干扰处理器, 在将阵列天线接收的时域数据变换成频域数据后, 可分别估计出每个频点的自相关矩阵。若用 $N \times N$ 维矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}(k)$ 表示频点 k 的自相关矩阵的估计值, 则其第 n 行第 i 列元素可表示为:

$$[\tilde{\mathbf{R}}(k)]_{ni} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_n^*(k, m) X_i(k, m), \quad n, i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: M 为估计相关矩阵所用的数据块数目; $(\cdot)^*$ 为共轭操作。针对频点 k , 以空域加权后的输出功率最小为优化目标, 可求出对应的 N 维空域加权重矢量为:

$$\tilde{\mathbf{h}}(k) = \frac{\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k) \tilde{\mathbf{u}}_s(k)}{\tilde{\mathbf{u}}_s^H(k) \tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k) \tilde{\mathbf{u}}_s(k)}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

式中 $\tilde{\mathbf{u}}_s(k)$ 为约束矢量, 不同的约束条件下, 表达不同: 当采用功率倒置(Power Inversion, PI)算法的约束条件时, $\tilde{\mathbf{u}}_s(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ ^[10]; 采用最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法的约束条件时, $\tilde{\mathbf{u}}_s(k)$ 为卫星信号的导向矢量^[12]。经空域加权后, 第 k 个频点的阵列输出为:

$$Y(k, m) = \sum_{n=1}^N \tilde{h}_n^*(k) X_n(k, m), \quad k=1, 2, \dots, K \quad (4)$$

式中 $\tilde{h}_n(k)$ 为权矢量 $\tilde{\mathbf{h}}(k)$ 的第 n 个元素。最后对空域加权后的频域数据进行逆 FFT 和窗函数补偿, 可得到第 m 个数据块经空频抗干扰处理器后的输出 $y(m)$, 其第 i 个元素 $y_i(m)$ 可表示为:

$$y_i(m) = \frac{1}{w_i N} \sum_{k=1}^K Y(k, m) e^{j \frac{2\pi}{K} (i-1)(k-1)}, \quad i=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

2 空频抗干扰引入的测量偏差分析方法

相比于频域，在时域分析抗干扰引入的测量偏差更为直观，将式(5)重写为：

$$y_i(m) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^K x_{nl}(m) h_{nl}(i), \quad i=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

式中

$$h_{nl}(i) = \frac{w_l}{w_i N} \sum_{k=1}^K \tilde{h}_n^*(k) e^{-j \frac{2\pi}{K} (i-l)(k-1)}, \quad i=1, 2, \dots, K \quad (7)$$

可以看出，天线阵接收的信号经空频抗干扰处理后，可等效为信号通过一个空时滤波器，空时滤波器的系数由 $h_{nl}(i)$ 确定。当空时滤波器不满足线性相位特性时，将引起 GNSS 信号畸变，这是空频抗干扰引入载波相位偏差的机理。

上述推导表明空频抗干扰处理模型较为复杂，若通过解析的方法从理论上分析空频抗干扰对 GNSS 信号载波相位测量的影响，则更为困难。本文采用数值方法进行分析，仿真模型结构见图 2，包括阵列信号生成单元和软件接收机两部分。阵列信号生成单元用于模拟天线阵接收到的多路卫星信号，含有多路干扰以及接收机内部热噪声；软件接收机对阵列信号生成单元的信号完成信号捕获、跟踪以及空频抗干扰处理等。

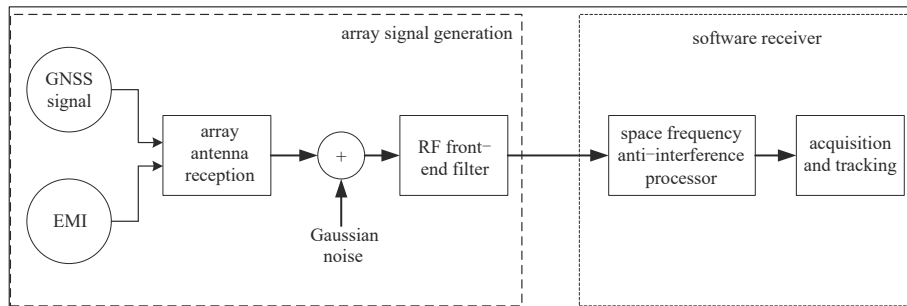


Fig.2 Structure diagram of simulation model
图 2 仿真模型结构图

由于本文的卫星信号通过仿真模型生成，其对应的载波相位的初始值已知，只要估计出空频抗干扰处理后的信号载波相位，通过与初始值比较，即可得出所引入的载波相位测量偏差。载波相位的估计通过载波跟踪环实现，文献[13]对载波跟踪环的原理进行了详细介绍，这里不再赘述。

为减小噪声引起的跟踪环路抖动对估计结果的影响，提高估计精确度，首先按照指定的空频抗干扰算法对输入数据(包括卫星信号、干扰以及噪声)进行处理，获取权矢量并存储下来；然后生成由纯卫星信号组成的阵列信号，并通过空频抗干扰处理器，空频抗干扰处理器的权矢量从第一步存储的权矢量中直接提取。经过空频抗干扰处理器后输出的信号中不含噪声和干扰，因此跟踪环可以精确估计出卫星信号的载波相位。

3 实验结果

实验采用工程中常用的四元中心圆形阵列天线，见图 3。本文主要关注空频抗干扰处理器本身对伪码和载波相位测量的影响，因此实验采用理想的各向同性天线阵元，1 个阵元位于圆心，其余 3 个阵元均匀分布在圆周上。圆半径为 GNSS 信号的半波长，射频前端为得到精确校正的理想带通滤波器。GNSS 信号中心频点为 1 268.52 MHz，采用北斗 B3 的二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK) 信号，码速率为 10.23 Mcps，初始载噪比为 45 dBHz。仿真中考虑使用 4 个不同方向的入射信号用于模拟干扰场景的变化，在 1 000 ms 时，加入一个与 GNSS 信号带宽相同的高斯宽带干扰；1 500 ms 时，加入一个与 GNSS 信号中心频点相同的窄带干扰(单频干扰)，干扰的干信比均为 60 dB。GNSS 信号和干扰

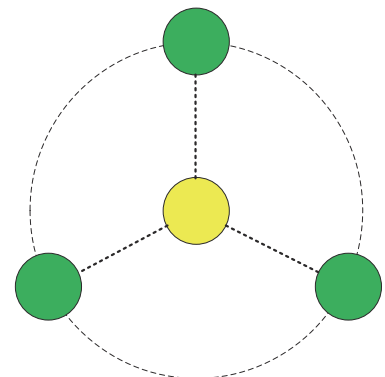


Fig.3 Schematic diagram of the four-element central circular array used in the experiment
图 3 实验用到的四单元中心圆阵示意图

的入射角设置参考了文献[14], 具体参数见表 1。

软件接收机采样率为 20.48 MHz, 空频抗干扰处理器的 FFT 长度为 $L=1024$, 阵列权矢量更新速率为 1 kHz, 总的信号时长为 2 000 ms。实验中, 空频抗干扰处理器的实现采用了空频 PI 和空频 MVDR 两种算法。

图 4 分别给出了空频抗干扰处理器对卫星信号 #1~#4 引入的载波相位偏差, 可以看出, 采用空频 PI 算法实现时, 在无干扰和没有引入载波相位测量偏差时段(0~150 ms), 载波相位偏差不为零。这是因为载波跟踪环还未完全跟踪所导致; 但在干扰开启后(1 000 ms 时), 引入了载波相位测量偏差。对比图 4 可以发现, 空频 PI 算法引入的载波相位测量偏差大小与卫星信号的入射方向有关, 且随着干扰场景的变化而发生跳变。此算法引入的载波相位偏差值最小为 6° 左右, 最大超过 80° 。

表 1 GNSS 信号和干扰的入射角

Table 1 Incidence angles of GNSS signals and interference

signal source	elevation/ $^\circ$	azimuth/ $^\circ$
satellite #1	40	0
satellite #2	30	30
satellite #3	40	60
satellite #4	50	90
Gaussian-broadband-interference	0	0
narrow-band interference	0	45

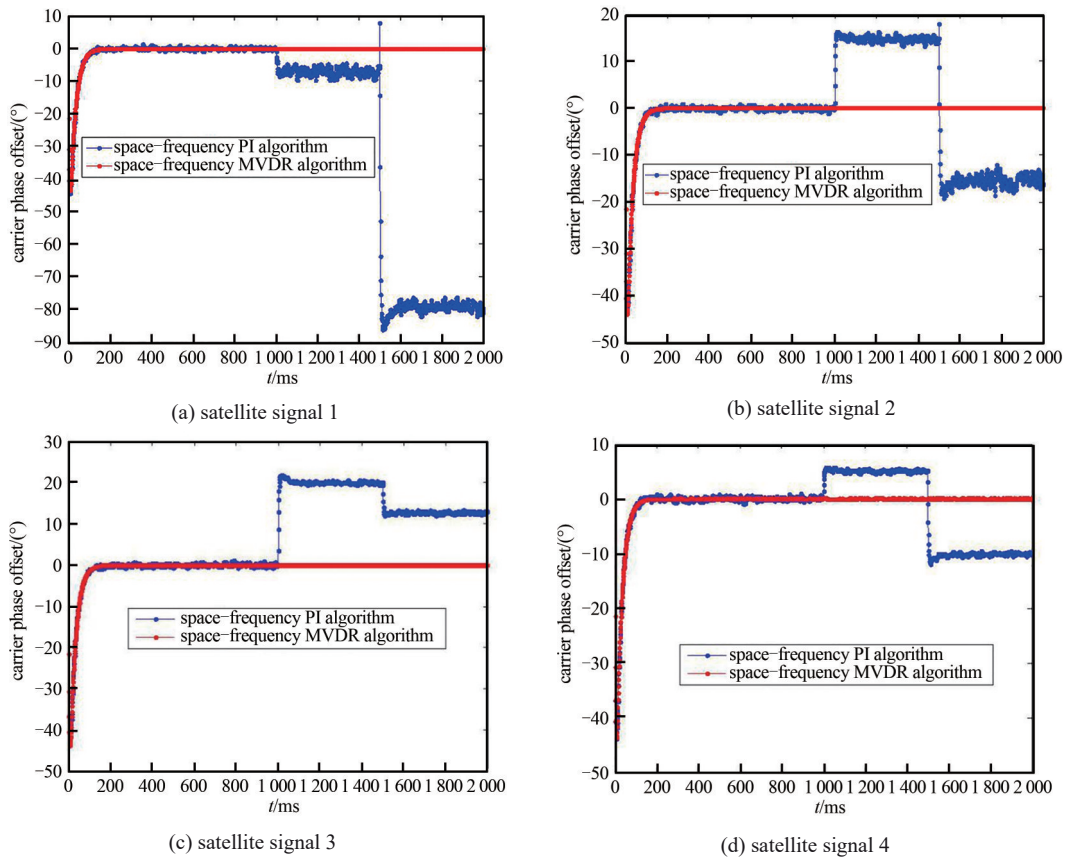


Fig.4 Carrier phase deviation introduced by space frequency anti-interference to satellite signal

图 4 空频抗干扰对卫星信号引入的载波相位偏差

当空频抗干扰处理器采用 MVDR 算法实现时, 没有引入载波相位测量偏差。这一结论与空时 MVDR 算法有很大差异, 文献[9]的研究结果表明, 空时 MVDR 算法会引入载波相位测量偏差。文献[9]通过增加约束条件对空时 MVDR 算法进行了改进, 保证其无偏, 但增加约束条件需要消耗空时自由度, 会不可避免地降低抗干扰性能。因此, 空频抗干扰处理更适用于依赖载波相位测量的高精确度应用领域。

4 结论

本文仿真分析了空频抗干扰处理器本身对 GNSS 载波相位测量的影响。结果表明, 采用空频 PI 算法实现时, 空频抗干扰处理器会引入与卫星信号入射方向以及干扰场景有关的载波相位测量偏差, 偏差值的大小从几度到几十度不等, 给载波整周模糊度的固定带来极大的挑战; 采用空频 MVDR 算法实现时, 在不对算法增加任何额外约束条件的前提下, 空频抗干扰处理器也不会引入载波相位测量偏差, 非常适用于对抗干扰性能和测量精确度均有苛刻要求的场合。

参考文献：

- [1] 丛玉良,冯达,李宏磊. 基于零陷展宽并加深的高动态GNSS抗干扰算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020,38(1):1-8. (CONG Yuliang,FENG Da,LI Honglei. High dynamic GNSS anti-jamming algorithms based on nulling widening and deepening[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2020,38(1):1-8.) doi:10.3969/j.issn.1671-5896.2020.01.001.
- [2] 张瑞华. 基于阵列天线的GNSS矢量接收机抗干扰算法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2018. (ZHANG Ruihua. Interference mitigation in GNSS vector tracking receiver based on array antenna[D]. Tianjin,China:Civil Aviation University of China, 2018.) doi:10.27627/d.cnki.gzmhy.2018.000023.
- [3] 史永清,李传军,杨尧. 对GNSS功率倒置自适应调零算法中步长取值的优化[J]. 电子信息对抗技术, 2022,37(6):8-12,59. (SHI Yongqing,LI Chuanjun,YANG Yao. Optimization of step size in GNSS power inversion adaptive nulling algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022,37(6):8-12,59.) doi:10.3969/j.issn.1674-2230.2022.06.002.
- [4] LEE K,LEE J. Design and evaluation of symmetric space-time adaptive processing of an array antenna for precise global navigation satellite system receivers[J]. IET Signal Processing, 2017,11(6):758-764.
- [5] XU Hailong,CUI Xiaowei,LU Mingquan. Data-oriented calibration method to reduce measurement bias in SFAP-based GNSS receivers[J]. Electronics Letters, 2018,54(9):591-593. doi:10.1049/el.2017.3692.
- [6] KIM U S. Mitigation of signal biases introduced by controlled reception pattern antennas in a high integrity carrier phase differential GPS system[D]. Palo Alto,USA:Stanford University, 2007.
- [7] BUCHANAN M,CHUANG Y C,O'BRIEN A J,et al. Verification of an optimal adaptive filtering algorithm for GNSS antenna arrays[J]. Navigation-Journal of the Institute of Navigation, 2016,63(4):393-404. doi:10.1002/navi.170.
- [8] XIE Yuchen,CHEN Yuwei,CHEN Feiqiang,et al. Carrier phase correction for GNSS space-time array processing based on frequency jerk detection[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2021,15(3):240-249. doi:10.1049/rsn2.12033.
- [9] CHEN Feiqiang,NIE Junwei,LI Baiyu,et al. Distortionless space-time adaptive processor for global navigation satellite system receiver[J]. Electronics Letters, 2015,51(25):2138-2139. doi:10.1049/el.2015.2832.
- [10] DAI Xinzhi,NIE Junwei,CHEN Feiqiang,et al. Distortionless space-time adaptive processor based on MVDR beamformer for GNSS receiver[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017,11(10):1488-1494. doi:10.1049/iet-rsn.2017.0168.
- [11] ZHANG Y D,AMIN M G. Anti-jamming GPS receiver with reduced phase distortions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10):635-638. doi:10.1109/LSP.2012.2209873.
- [12] SOMASUNDARAM S D,BUTT N R,JAKOBSSON A,et al. Low-complexity uncertainty-set-based robust adaptive beamforming for passive sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015(99):1-17. doi:10.1109/JOE.2015.2474495.
- [13] CHAO Chen,CHANG Guobin. Low-cost GNSS/INS integration for enhanced land vehicle performance[J]. Measurement Science and Technology, 2019,31(3):035009. doi:10.1088/1361-6501/ab52cb.
- [14] BRAUN B. Performance analysis of GNSS-aided inertial navigation systems on spinning flight vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019,56(5):1624-1635. doi:10.2514/1.A34403.

作者简介：

张 伟(1984-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 主要从事扩频通信方面的研究. email:KG08_13@163.com.

彭梓洋(2002-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事控制工程领域研究.

马竞羽(1991-), 女, 学士, 主要从事图像处理方面的研究.

贺智勇(1981-), 男, 学士, 工程师, 主要从事计算仿真领域研究.