

基于权值平滑的自适应调零算法研究与实现

张秀清 侯学冬 安国臣 伊宏波 王晓君

(河北科技大学信息科学与工程学院 石家庄 050018)

摘要: 在卫星导航定位系统中,由于导航信号的功率较低,在到达地面时极易受到干扰,导致定位失败。自适应调零技术可以有效地提高卫星导航接收机的抗干扰能力,然而由于常规的空时联合最小功率响应会时常出现零陷抖动,不能有效的对准干扰来向,从而导致接收机的抗干扰性能下降。对于该情况,本文提出对抗干扰算法中的权值进行平滑滤波处理的方法,并且通过仿真验证、FPGA实现、现场实测等手段验证了该算法的可行性。该方法可有效抑制系统权值以及零陷位置的抖动,从而提高抗干扰算法的稳定性和可靠性,对相关工程领域具有一定的参考价值。

关键词: 数据处理;自适应调零技术;空时联合域滤波;阵列信号处理;平滑滤波

中图分类号: TN973.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research and implementation of adaptive nulling algorithm based on weight smoothing

Zhang Xiuqing Hou Xuedong An Guochen Yi Hongbo Wang Xiaojun

(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In the satellite navigation and positioning system, due to the low power of the navigation signal, it is easy to be interfered when it reaches the ground, resulting in positioning failure. Adaptive null steering technology can effectively improve the anti-jamming ability of satellite navigation receiver. However, due to the common space-time combined minimum power response, null steering jitter often occurs, so the anti-jamming performance of the receiver can not be effectively aligned. In this case, the paper proposes a method of smoothing and filtering the weights in the anti-interference algorithm, and verifies the feasibility of the algorithm by means of simulation, FPGA implementation and field measurement. This method can effectively suppress the jitter of the system weight and the zero trap position, so as to improve the stability and reliability of the anti-interference algorithm, and has certain reference value for related engineering fields.

Keywords: data processing; adaptive null steering technology; space-time joint domain filtering; array signal processing; smooth filtering

0 引言

卫星导航是利用导航卫星发送定位信号,实时为用户提供导航定位的技术。导航卫星与地面距离长达两万到三万公里,且卫星发射功率一般仅有几十瓦,故卫星导航信号到达接收机时的信号功率非常微弱。由于导航信号十分微弱的特性,使得其极易受到各种有意和无意的干扰,其中压制式干扰为最常见的一种干扰方式^[1-2]。压制式干扰是使用干扰设备发射一段与导航信号同样频段的信号用来掩盖导航信号,并且干扰信号的功率远大于导航信号的功率,使导航信号淹没在干扰信号中,导致接收机无法识别导航信号,从而无法进行定位^[3-5]。自适应调零天线可以不需要

预知干扰信息就可以自适应的在干扰方向形成较深的零陷,该技术适用于卫星导航信号弱而干扰信号强的环境。目前该种算法已经成为了主流的卫星导航抗干扰技术^[6-10]。

自适应调零算法的权值计算核心为采样协方差矩阵的逆矩阵,由于其每次更新权值均为独立数据与其他权值不相关且阵元间存在互耦、AD采样存在随机误差等原因,导致该算法鲁棒性差、零陷位置存在抖动,且由于权值更新速度慢,导致计算权值与权值处理的数据并不是同一组数据,时常出现干扰信号与零陷位置失配,从而不能很好的抑制干扰信号,最终导致接收机定位效果不好甚至导致接收机失效^[11]。

为了解决零陷位置抖动问题,国内外学者对此都做了一些研究,其中最小均方(least mean square, LMS)算法由于其迭代运算的结构,最终所计算出的权值较为稳定,但那种算法需要预先知道期望信号,这在实际应用中几乎不可能预先得知^[12-14]。另一种解决干扰信号与零陷位置存在偏差问题的方式为利用迭代思想对权值进行平滑滤波,文献[15]提出使用多项式平滑滤波算法对权值进行修正,再更新自适应处理单元的方法,该种方式可以平滑权值数据从而抑制零陷位置抖动,然而该算法需要存入过多的历史数据并且算法复杂,难于实现。

本文根据自适应调零抗干扰算法特点,在传统的空时自适应处理(spacer time adaptive processing, STAP)的基础上,提出一种易于实现的权值平滑算法。本文推导了该算法的实现方式,并在七阵元有中心均匀圆阵仿真模型上进行了算法仿真,最后应用在抗干扰天线中进行了实际测试并给出测试结果。

1 空时自适应滤波模型

STAP 顾名思义是将一维的空域滤波技术推广到空间与时间二维域中,形成空时二维处理结构,空时自适应处理数据模型如图 1 所示。

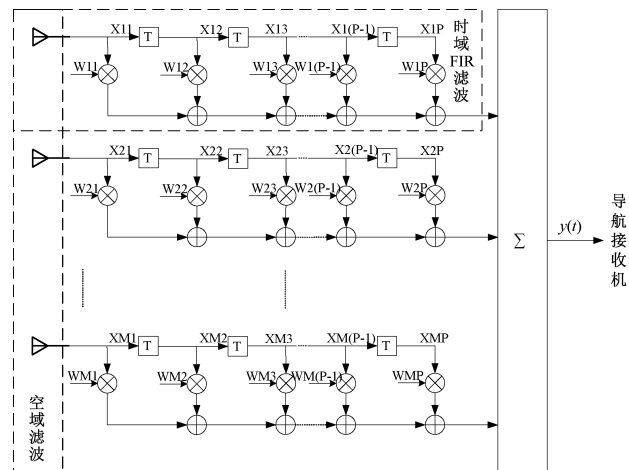


图 1 空时自适应处理数据模型图

Fig. 1 Diagram of the data model for spacer time adaptive processing

其中共有 M 个阵元, P 个延时抽头。从其中一个阵元通道来看,各级延迟的节点构成 FIR 滤波,可以在时域维度滤除干扰;从不同阵元通道来看,各个阵元构成空域滤波,可以在空间上滤除干扰信号。所以,空时自适应滤波可以滤除空时二维域的干扰。

其中接收到的基带信号 $x(t)$ 在 t 时刻表示为:

$$x(t) = s(t) + \sum_{q=1}^Q j_q(t) + e(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为卫星信号; $j_q(t)$ 为第 q 个干扰信号; $e(t)$ 为加性高斯白噪声。在调零天线空时二维通道中,接收总信

号 \mathbf{X} 以及空时权矢量 \mathbf{W} 为:

$$\mathbf{X}(t) = [x_{11}(t), x_{12}(t), \dots, x_{1P}(t), \dots, x_{M1}(t), \dots, x_{MP}(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = [\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1P}, \dots, \omega_{M1}, \dots, \omega_{MP}]^T \quad (3)$$

空时调零天线的输出为:

$$y(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (4)$$

式中: T 为矩阵的转置, H 为矩阵的共轭转置。

空时最小功率(power inversion, PI)算法常用于导航抗干扰天线中,其算法优势在于输出功率最小,正好契合卫星导航信号在到达接收机时很弱,而干扰信号往往远高于导航信号这一特点。该方法约束参考天线的第一个阵元的第一个抽头的加权值为 1,然后约束输出信号功率最小来获得加权矢量,即:

$$\begin{cases} \min_w \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{XX} \mathbf{W} \\ s. t. \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{R}_{XX} 为输入信号的协方差矩阵, $\mathbf{R}_{XX} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{X}(n) \mathbf{X}^H(n)$, $\mathbf{S} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 是一个 $MP \times 1$ 维矢量,根据拉格朗日准则,可求得加权矢量为:

$$\mathbf{W}_{opt} = \frac{\mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{S}} \quad (6)$$

方向图为阵列权矢量对不同角度信号的阵列响应,其公式为:

$$\mathbf{F}(\theta) = \mathbf{W} \boldsymbol{\alpha}(\theta) \quad (7)$$

$$\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\alpha}(\theta) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (N-1) d \sin\theta}] \quad (9)$$

其中,导向矢量 $\boldsymbol{\alpha}(\theta)$ 仅与信号入射角有关,当信号入射方向确定时,阵列响应 $\mathbf{F}(\theta)$ 仅与权矢量 \mathbf{W} 有关。

在实际测试中,由于抗干扰系统的鲁棒性不强,当前计算出的权值直接作用在之后到达的数据上,没有历史权值进行修正,以至于干扰环境稍微发生抖动时,其权值抖动明显,直接效果为导致阵列响应中零陷位置与信号入射角失配,抗干扰性能变差,导致接收机定位效果不佳,甚至出现接收机无法定位的情况。

2 权值平滑算法原理

针对第二章所出现的权值抖动情况,本文在原有的空时联合抗干扰算法的基础上提出了添加权值平滑模块来提高系统稳定性的思想。

2.1 算法模型

指数加权平均算法是一种常用的信号处理算法,其算法原理简单易于实现,适用于对信号的降噪以及减小由于信号突发抖动对数据产生的影响。

指数加权平均公式如式(10)所示,其中 θ_t 为第 t 次计算出的权值数据, V_{t-1} 为前 $t-1$ 次的加权平均值, V_t 为要替代的 θ_t 的估计值,也就是第 t 次的指数加权平均值, β 为

可调节参数,取值范围为 $[0,1]$ 。

$$V_t = \begin{cases} \theta_t, & t = 1 \\ \beta V_{t-1} + (1-\beta)\theta_t, & t > 1 \end{cases} \quad (10)$$

若令 $\beta = 0.9, t = 100$,此时将 V_{100} 展开得:

$$V_{100} = 0.1\theta_{100} + 0.9V_{99} = 0.1\theta_{100} + 0.9(0.1\theta_{99} + 0.9V_{98}) = \dots = 0.1\theta_{100} + 0.1 \times 0.9\theta_{99} + \dots + 0.1 \times 0.9^{99}\theta_1 \quad (11)$$

经过式(11)展开。

在不考虑公共系数0.1时,将各项的系数中的指数部分提取出来如图2所示。可以发现在距离输出越近的数据点其系数越大,对输出的影响越大;距离输出越远的数据点其系数越小,对输出的影响越小。因此,此算法的输出对较近的历史数据更为敏感。

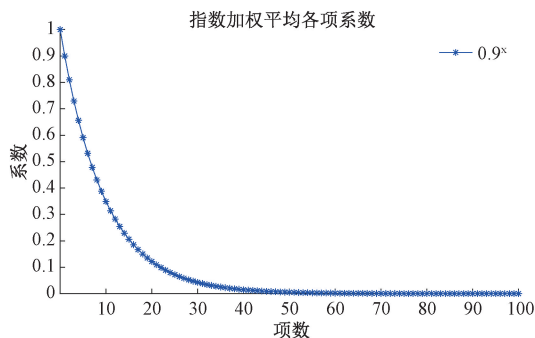
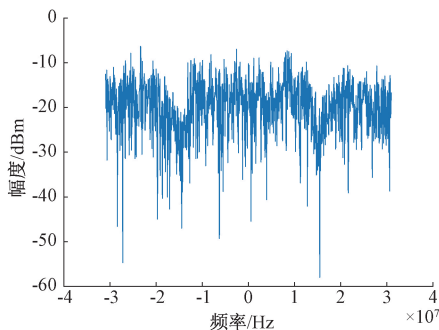


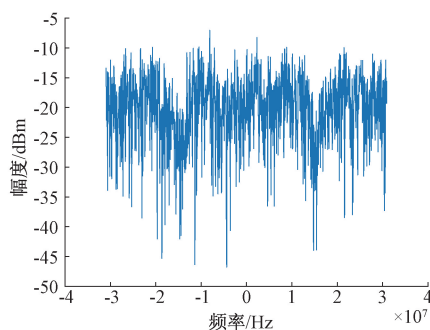
图2 指数加权系数变化

Fig. 2 Change in index weighting factor



(a) 无权重平滑加权后频域分析

(a) Frequency domain analysis after unweighted value smoothing and weighting



(b) 有权重平滑加权后频域分析

(b) Frequency domain analysis after weighted value smoothing and weighting

图3 权值平滑前后信号频域波形

Fig. 3 Time-frequency domain waveforms of the signal before and after weight smoothing

小,分别对两组数据的频域求带内平均功率,可得其抗干扰后带内平均功率分别为 -18.8218 dB、 -19.7993 dB,由于经过平滑算法的权值对数据加权后的频谱带内功率小,所以可得出经过权值平滑的抗干扰系统对干扰信号的滤除效果更好。

利用方向图直观反映权值所形成零陷的俯仰、方位角,图4所示为权值平滑前后方向图,绘制该方向图的数据为在实际干扰场地所采集的权值,图4(a)与(c)为未

综上,指数加权平均算法的系统资源占用小,仅需要存储一次历史数据,由于该算法的递推结构可以使得数据的响应速度较快,并且由于距离数据点近的历史数据所占权重重大、距离数据点远的历史数据所占权重小,所以同样适用于动态场景。

2.2 算法仿真验证

为验证权值平滑算法为时空联合抗干扰算法所提高的抗干扰性能,仿真中采用七阵元均匀圆阵,时域抽头数为八抽头,将FPGA在干扰场地中所采集的AD数据、权值数据导入仿真软件中,通过仿真软件对未添加权值平滑的时空联合抗干扰算法与添加了权值平滑模块的时空联合抗干扰算法进行对比,验证该算法是否能提高抗干扰性能。

由于空时调零算法所抗干扰为压制式干扰,该算法可以对干扰方向的信号进行抑制,所以可以直观反映抗干扰算法性能的方式为:分析经过抗干扰算法后的信号频域波形其带内功率的大小,当带内功率较大时则反映为对干扰信号的抑制较弱、当功率较小时则反映为对干扰信号的抑制较强。下面对同一组数据分别使用未进行权值平滑算法的权值与进行过权值平滑算法的权值均对同一组数据进行加权,分析加权后数据的带内功率。

图3(a)为使用未经过平滑算法的权值对输入数据进行加权后的频域信号波形。图3(b)为使用经过平滑算法的权值对输入数据进行加权后的频域信号波形。由该图可以分析添加权值平滑算法是否具有效果,图中可以看出添加权值平滑算法后频域的功率比未添加权值平滑算法的

经过平滑滤波的权值所绘制的方向图,图4(b)与(d)为经过平滑滤波的权值所绘制的方向图,由图可以看出,正常情况下,中间零陷所在位置应为方位角 152° 、俯仰角 22° 附近,但图4(a)中的中间零陷位置发生了巨大改变,而权值经过平滑滤波后会对该偏差进行修正。

根据以上2种验证方式,可以得出权值平滑可以提高抗干扰系统的稳定性,以及可以提高系统的性能。

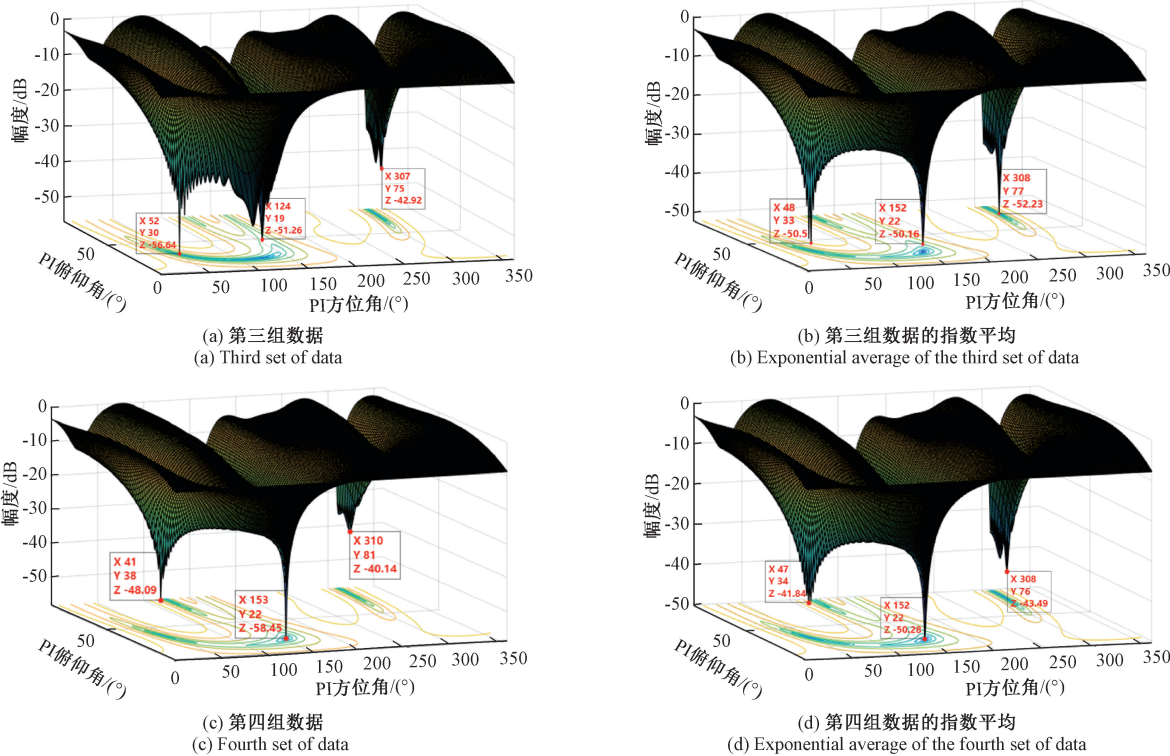


图 4 权值平滑前后方向图

Fig. 4 Orientation before and after weight smoothing

3 FPGA 实现架构设计

在该系统中,空时联合域导航抗干扰算法整体流程图如图 5 所示。FPGA 通过 AD 模块采集到导航信号后,第 1 步将七路 AD 信号进行帧同步以及位同步,第 2 步对七路信号同时进行数据预处理,第 3 步将处理完的数据进行权值计算(通过实测发现每 1.9 ms 计算完成一次权值),第 4 步将计算完成的

权值进行平滑滤波,然后后续(1.9 ms 内)到来的数据经过上述处理之后再与计算完成的权值进行基带信号定点加权,最后通过对加权后的数据经过处理后使用 DA 模块将经过抗干扰处理的数据输出至导航接收机,用于接收机定位。其中由于权值更新算法复杂,计算权值的时间远远大于信号采集的时间,所以很多组数据都要使用同一组权值进行加权,直到下一组权值计算完成,再对系统的权值进行更新。

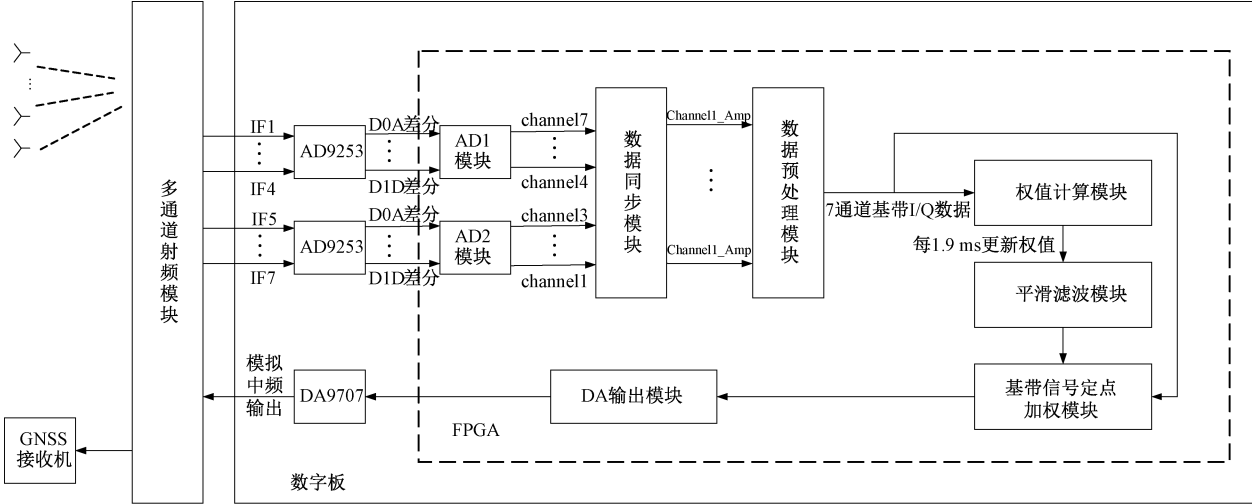


图 5 系统框图

Fig. 5 System block diagram

在该系统中,将权值平滑模块添加在权值计算模块和基带信号定点加权模块之间,在计算完权值后不再直接对基带信号进行加权,而是先经过平滑滤波算法再使用平滑过的权值对基带信号进行加权。权值平滑模块的结构框图如图 6 所示,其中 W_r 为权值的实部、 W_i 为权值的虚部、 W_vaild 为权值使能信号。权值计算模块计算出权值之后进入权值平滑模块,权值平滑模块共分为两部分,一部分是直接输出权值计算模块计算出的权值;另一部分则是输出经过算法处理后的平滑权值。将整个模块分为两

部分的模块为判断 FIFO 输入模块和判断输出模块,在第一次计算出权值时判断 FIFO 输入模块会将该组权值直接存入 FIFO 中,并且判断输出模块会直接将该组权值输出;在第二及以上次计算出权值时,该模块会执行算法部分,该算法将 FIFO 中的数据取出并与 β 进行浮点数相乘、将该次输入的权值于 $1-\beta$ 进行浮点数相乘,然后将两组相乘的结果进行浮点数相加,最终判断输出模块会将该次运算结果进行输出、判断 FIFO 输入模块将该次运算结果存入 FIFO 中用于下次计算。

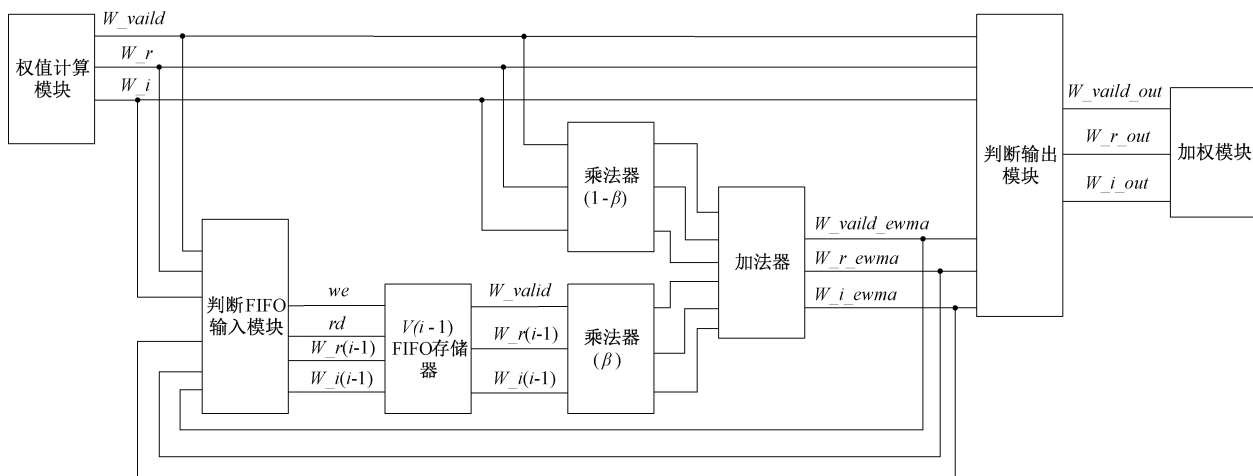


图 6 权值平滑模块结构框图

Fig. 6 Block diagram of the structure of the weight smoothing module

如图 7 所示,使用 FPGA 对上述模块进行仿真,在权值计算模块数据到来时,经过 22 个时钟周期后,权值平滑

算法运算完成,开始将平滑后的权值进行输出。

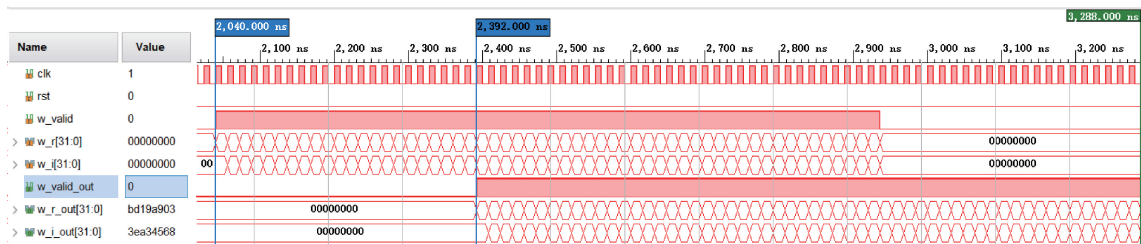


图 7 FPGA 仿真图

Fig. 7 FPGA simulation diagram

为了验证 FPGA 权值平滑算法结果的正确性,下面选择一组使用 FPGA 计算出的权值平滑后的数据与 MATLAB 计算出的权值平滑后的数据进行比较。如表 1 所示,由于一组权值数据较多,这里选择了一组中的一部分权值进行比较,其中从左向右的列分别表示为 FPGA 计算出的权值实部、MATLAB 计算出的权值实部、实部绝对误差、FPGA 计算出的权值虚部、MATLAB 计算出的权值虚部、虚部绝对误差。由表可以看出,权值的计算结果偏差很小,相差最大的数据也仅在小数点后七位。由于 FPGA 的数据类型为单精度浮点数而 MATLAB 的数据类型为双精度浮点数,所以两组数据存在的误差仅是因为数

据的精度所导致的。

4 现场实测与数据分析

为了验证权值平滑算法是否能提高传统空时调零算法的稳定性,于是将调零天线置于干扰场地进行测试,干扰场地如图 8 所示,该场地为一个圆形场地,将抗干扰天线以及导航接收机放置于圆心位置,外围有 6 个干扰源,每个干扰源的方位角相差 60° ,干扰源对圆心的俯仰角可在 $[-90, 90]$ 度范围内进行调节,且每个干扰源的位置距离圆心处的调零天线约 3 m 左右,该距离可以将干扰源所发射的干扰信号近似视为平面波的形式入射到调零天线中。

表 1 结算结果比较

Table 1 Comparison of settlement results

FPGA 实部	MATLAB 实部	实部绝对误差	FPGA 虚部	MATLAB 虚部	虚部绝对误差
1	1	0	0	0	0
-1.085 393 78	-1.085 393 96	1.751×10^{-7}	-0.130 248 57	-0.130 248 57	3.061×10^{-9}
0.321 577 25	0.321 577 33	8.778×10^{-8}	0.035 076 97	0.035 076 97	3.351×10^{-9}
0.299 688 66	0.299 688 68	1.609×10^{-8}	0.061 795 84	0.061 795 85	5.708×10^{-9}
-0.116 534 27	-0.116 534 28	1.098×10^{-8}	0.055 633 27	0.055 633 28	9.537×10^{-9}
-0.113 480 13	-0.113 480 15	1.636×10^{-8}	0.098 474 54	0.098 474 56	1.644×10^{-8}
0.037 611 48	0.037 611 48	8.843×10^{-10}	0.060 133 14	0.060 133 15	1.082×10^{-8}



图 8 干扰场地
Fig. 8 Disturbed sites

图 9 所示为权值曲线图,该曲线数据采集于调零天线,在场地上施加干扰后,使用 VIVADO 软件连续抓取 1 024 组未经过权值平滑的权值数据以及 1 024 组经过权值平滑后的权值数据,然后选择任意一维度权值数据求其幅值,对两种权值曲线进行绘制。从图中可知,未经过权值平滑算法的权值数据抖动较为明显,经过权值平滑算法的权值则更为稳定。

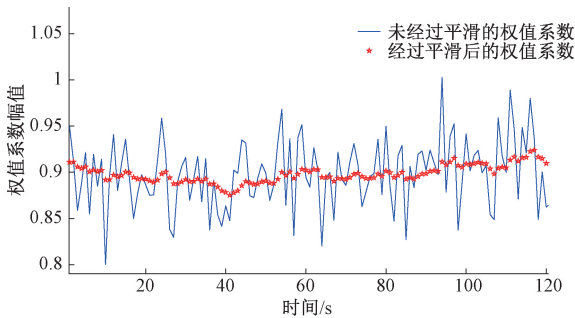


图 9 权值曲线
Fig. 9 Weighting curves

图 10 所示为零陷位置散点图,该图是由 1 024 组未经过权值平滑算法的权值与 1 024 组进行过权值平滑算法的权值经过求方向图算法后,扫描所得的零陷的位置,图中

纵横坐标分别表示为零陷的方位角和俯仰角,其中圆形散点为未经过权值平滑算法的权值数据对应的零陷坐标,矩形散点为经过权值平滑算法的权值数据对应的零陷坐标。由图可知,经过权值平滑算法后的权值所计算出来的零陷坐标更加稳定。

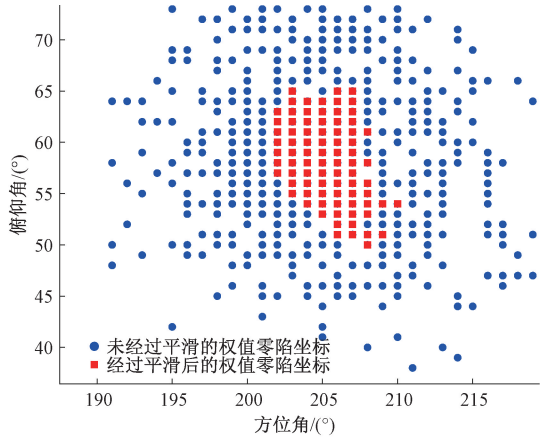


图 10 零陷位置散点图
Fig. 10 Scatter plot of zero-sag location

验证平滑算法效果好坏最直观的方式则是接收机的定位效果,在干扰场地里施加干扰后,首先不开权值平滑算法,使用上位机观察接收机的定位效果;然后打开权值平滑算法观察接收机的定位效果,如图 11、图 12 所示,分别为未开启平滑算法时上位机的定位效果图和开启平滑

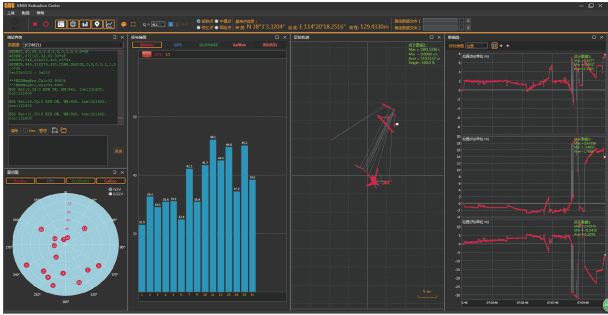


图 11 未开启平滑算法定位效果图
Fig. 11 Positioning effect without smoothing algorithm on

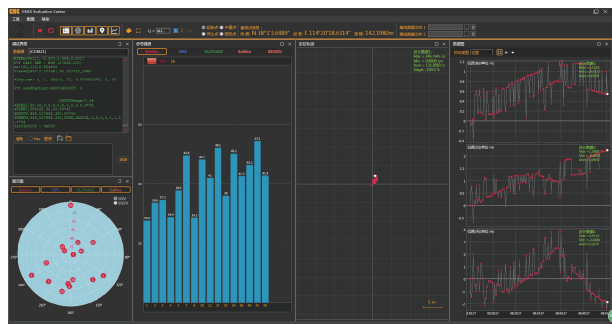


图12 开启平滑算法定位效果图

Fig. 12 Positioning effect with smoothing algorithm on

算法后上位机的定位效果图。当未开启平滑算法时,接收机可以接收到15颗卫星的信号,信噪比并不低,但接收机定位效果偏差,定位点在15 m范围内来回波动;当开启平滑算法时,接收机可以接收到16颗卫星的信号,并且信噪比普遍比未开启平滑算法时的信噪比要高,定位效果比未开启平滑算法时更好,可以在精确到3 m范围内波动。

5 结 论

权值平滑滤波算法通过对系统权值进行一级修正,可以有效解决传统PI算法存在的零陷抖动问题。该算法与PI算法进行结合,可以改善调零天线的抗干扰性能,使导航接收机能够更加准确的进行定位。该算法复杂度以及所占FPGA资源均不多,易于实现,对卫星导航抗干扰技术工程应用提供了新的方向。

本文算法仅考虑了静态以及低动态环境下的导航信号抗干扰性能提升,因此在后续的研究过程中,还需要对高动态等环境下的算法改进作进一步研究。

参考文献

- [1] 贾智慧. 卫星导航天线抗干扰技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] 杨琼. 卫星导航接收机抗干扰技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2022.
- [3] 鲁祖坤. 卫星导航天线阵抗干扰关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- [4] KARAIM M, ELGHAMRAWY H, TAMAZIN M, et al. Investigation of the effects of white gaussian noise jamming on commercial GNSS receivers[C]. ICCES, 2017: 468-472.
- [5] FAN G T, TANG X M, NIE J W, et al. A Zero Bias Frequency-Domain Interference Suppressor for GNSS Receivers[J]. IEICE Transactions on Communications, 2016, 99(9): 2081-2086.
- [6] 戚连刚. 复合干扰环境下卫星导航信号捕获抗干扰方

法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

QI L G. Research on anti-jamming method of satellite navigation signal capture under compound interference environment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

- [7] 陈鲤文. 高动态 GNSS 接收系统压制性干扰抑制技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [8] 刘朝云. 稳健的导航抗干扰算法研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [9] 张忠传, 牟善祥, 李成果, 等. 鲁棒性自适应波束形成算法关键技术研究[J]. 制导与引信, 2008, 29(1): 31-37.
- [10] 吴文浩, 赖鹏辉, 王昊, 等. 一种基于矩阵重组的功率倒置改进算法[J]. 电讯技术, 2021, 61(2): 164-171.
- [11] 毛晓军. 高性能阵列天线稳健自适应波束形成技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [12] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [13] 陈泳, 田金鹏, 刘燕平. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 27-31.
- [14] 颜维平. 北斗抗干扰天线的设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [15] 陈雪峰, 刘洋. 平滑滤波在卫星导航抗干扰天线中的应用[J]. 电子设计工程, 2014, 22(1): 17-19, 23.

作者简介

张秀清, 副教授, 主要研究方向为智能信息处理技术。
E-mail: 894367585@qq.com

侯学冬(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、导航抗干扰算法设计与工程实现。
E-mail: 614520224@qq.com

安国臣, 副教授, 主要研究方向为实时信号处理算法设计与工程实现。
E-mail: angch@163.com

伊宏波, 硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理。
E-mail: 729599545@qq.com

王晓君, 教授, 主要研究方向为数字信号处理。
E-mail: miracle@hebust.edu.cn