

空时联合抗干扰降维处理的设计与实现

操礼长, 刘军锋, 汪筱阳, 鲁高飞, 柯影

中国西安卫星测控中心, 陕西 西安
Email: jfliu05@126.com, wangxiaoyang1987@163.com

收稿日期: 2021年8月24日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

摘要

针对星地测控链路采用的空时联合抗干扰方法中计算量大、系统复杂、难以适应复杂电磁环境干扰抑制等特点, 提出了简单迭代法与高斯-赛德尔迭代法组合法。采取降维处理, 将空时数据处理的维数分成若干段, 段内采用简单迭代法, 段外则采用高斯-赛德尔迭代法, 以增强算法的收敛性和并行性。通过仿真, 验证了这种组合法的可行性。

关键词

空时二维滤波, 简单迭代法, 高斯-赛德尔迭代法

Design and Implementation of Space-Time Joint Anti-Interference and Dimensionality Reduction

Lichang Cao, Junfeng Liu, Xiaoyang Wang, Gaofei Lu, Ying Ke

Xi'an Satellite Control Center, Xi'an Shaanxi
Email: jfliu05@126.com, wangxiaoyang1987@163.com

Received: Aug. 24th, 2021; accepted: Sep. 19th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

Abstract

Aiming at the characteristics of the space-time joint anti-jamming method adopted by the satellite-to-ground measurement and control link, such as the large amount of calculation, the complexity of the system, and the difficulty of adapting to the interference suppression of the complex electromagnetic environment, a combination method of simple iteration method and Gauss-Seidel iteration method is proposed. Dimension processing, dividing the dimension of space-time data

processing into several segments, using simple iterative method inside the segment, and Gauss-Seidel iterative method outside the segment to enhance the convergence and parallelism of the algorithm. Through simulation, the feasibility of this combined method is verified.

Keywords

Space-Time Two-Dimensional Filtering, Simple Iteration, Gauss-Seidel Iteration Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为有效应对星地链路的空间电磁干扰,航天测控系统采取了多种技术,也取得了一定的成效,其中,采用空时联合抗干扰技术,将一维的时域或空域干扰抑制方法拓展至时间与空间联合抑制干扰的二维域中[1] [2] [3],对干扰信号进行空时二维滤波,干扰抑制能力可达 80 dB 以上。

空时二维联合抗干扰的关键,在于空时权矢量的求解。目前,空时权矢量的求解方法主要采用最小均方误差准则、最小干信比准则、最大似然准则、线性约束最小方差准则等[4] [5]。各种约束准则均有其适用范围,工程上,可根据不同的应用场景,选择不同的约束准则。由于线性约束最小方差准则能够较好地削弱干扰信号的能量,得到了广泛使用。

直接利用基于线性约束最小方差准则进行空时权值计算时,需引入矩阵求逆运算。当空时二维的维数较大时,即天线阵元数目与时间单元数目的乘积较大时,可获得较好的抗干扰效果,对来自多方向干扰信号的抑制能力表现不俗,但因是维,运算量很大,需要很长的运算时间,系统的复杂度也较高,这将影响系统的收敛性,且降低了抗干扰的时效性,难以适用于复杂电磁环境干扰信号的抑制。

针对基于线性约束最小方差准则计算量大的问题,需要优化。目前,线性约束最小方差准则的空时二维联合抗干扰算法,主要有直接矩阵求逆、直接解线性方程组、辅助向量滤波、多级维纳滤波、简化多步迭代、主成分法、互谱密度法等[6] [7] [8] [9],各种方法的比较如表 1 所示。

Table 1. Comparison of several algorithms using linear constrained minimum variance criterion

表 1. 运用线性约束最小方差准则的几种算法比较

种类	主要思想	复杂度	计算量	主要特点
直接矩阵求逆法	通过矩阵分块的方式递归求逆	高	大	效率低, 难实现
直接解方程组法	直接解权矢量方程组	低	较大	效率高, 易实现
主成分法	选取协方差矩阵的大特征值	高	大	过程复杂, 难实现
互谱密度法	选取互谱函数的最大能量	较高	较大	过程较复杂, 难实现
辅助向量滤波法	采用梯度算法递归	较高	大	迭代次数多, 时效性差
多级维纳滤波法	利用多级维纳滤波器来简化处理	高	大	效率低, 难实现
简化多步迭代法	利用数据域相关原则来简化处理	较高	中	效率较高, 易实现

从表 1 中可以看出, 效率高、易实现的主要有直接解线性方程组法、简化多步迭代法, 其中, 直接解线性方程组法包括高斯消元法、矩阵三角分解法等, 而简化多步迭代法也包括简单迭代法、高斯 - 赛德尔迭代法、松弛迭代法、最陡下降法等。上述方法的使用时需要权衡实现的难易程度以及算法的效率, 本文给出一种组合方法, 综合运用简单迭代法与高斯 - 赛德尔迭代法, 发挥简单迭代法并行能力强以及高斯 - 赛德尔迭代法易收敛的优势, 在保证计算能够快速收敛的同时, 又较好地发挥 FPGA 的并行实现能力。

2. 算法设计

简单迭代法与高斯 - 赛德尔迭代法的组合方法, 实质上是降维处理的方法。其主要处理过程为: 首先将空时数据处理的维数分成若干段, 每一段含有 m 个数据; 其次, 在每一次权值更新时, 计算本次数据相乘时的乘法结果, 不进行累加; 最后, 在下次权值更新时计算其累加值。由于采用了分段处理, 在进行矩阵运算时, 大大降低了计算量。算法设计如下:

首先, 基于线性约束最小方差准则, 得出线性迭代方法的权值求解公式为:

$$W = (I - R_x)W + S = CW + S \quad (1)$$

式中:

I 为单位矩阵;

R_x 为空时二维权矢量, 为输入的协方差矩阵;

$C = I - R_x$, 为迭代算法的系数矩阵;

S 为 $MP \times 1$ 维的约束向量, M 为阵列天线的阵元数目, P 为时间单元数目。

其次, 将简单迭代法与高斯 - 赛德尔迭代法相结合, 组合后的计算公式为:

$$\begin{cases} w_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{MP} c_{ij} w_j^k + s_i & i = 1, 2, \dots, L \\ w_i^{k+1} = \sum_{j=1}^L c_{ij} w_j^{k+1} + \sum_{j=L+1}^{MP} c_{ij} w_j^k + s_i & i = L, L+1, \dots, 2L \\ \dots \\ w_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{(U-1)L} c_{ij} w_j^{k+1} + \sum_{j=UL-L+1}^{MP} c_{ij} w_j^k + s_i & i = UL-L+1, \dots, UL \end{cases} \quad (2)$$

式中:

S 为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_{MP}]^T$ 中第 i 个权值的第 k 次迭代结果, s_i 为 S 的第 i 个值;

L 为同时进行更新的权值数目, 共有 $MP/L = U$ 个;

U 为将空时处理维数 MP 分成的段数。

由以上算法设计可以看出, 这种组合方法在每一次权值更新时, 只计算本次数据相乘时的乘法结果, 而不累加。在下次权值更新时才计算累加值。因为浮点乘法与浮点加法, 在 FPGA 中执行一次所需要的时间基本相同。在每次计算权值时, 实际上, 使用了前两次以及所有之前的权值更新结果。在硬件实现上, 相当于组合使用了采用了的简单迭代法与高斯 - 赛德尔迭代法, 它既充分利用了硬件资源, 又最大程度地提高了空时抗干扰处理的时效性。同时, 每次行向量与列向量相乘时, 本次矩阵元素乘法运算与上次矩阵元素乘法运算结果累加过程同时进行, 如果乘法过程与加法过程所进行的步骤数目完全相同, 则可充分地利用资源, 使迭代过程在最短的时间内结束。此时需满足下列条件:

$$\log_2 m = MP/m \quad (3)$$

式中:

MP 为空时数据处理的维数;

m 为同时并行执行的乘法器个数。

3. 实现方法

工程上,可采取如下方法实现:首先,使用阵列天线接收射频干扰信号,并将干扰信号下变频至中频;然后,对中频信号的每个信道进行 A/D 变换;之后,再进行空时二维联合自适应权值计算;最后,将空时权值与接收的空时信号相乘,得到空时抗干扰后的接收数据,并输出至测控接收机。其中,在空时二维联合自适应权值计算时,中频信号 A/D 变换后,还要进行 FIR 低通滤波,其结构框图如图 1 所示。

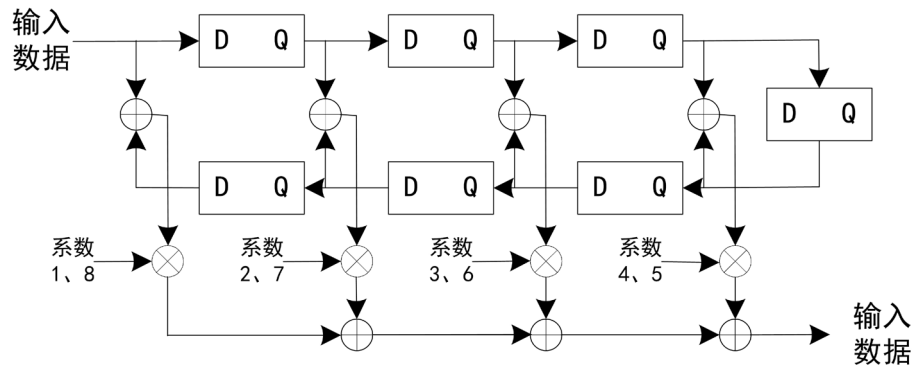


Figure 1. Structural block diagram of FIR low-pass filter

图 1. FIR 低通滤波器结构框图

图 1 给出了一个 8 级滤波器的实现框图,其他级数的滤波器实现方法与图 1 类似。FIR 低通滤波器的实现过程如下:首先,根据所要求的滤波器性能,选择滤波器的级数、窗函数等,进行滤波器的系数设计;然后,利用 FIR 滤波器系数具有对称性的特点,采用分布式的方式,将系数相同的延迟节点数据进行相加,之后,再与滤波器的系数相乘;最后,将所有乘积结果累加。之后,计算每一时刻的空时二维接收向量,并进行存储,即该向量可表示为:

$$X = [x_{11} x_{12} \cdots x_{1p} x_{21} x_{22} \cdots x_{2p} \cdots x_{M1} x_{M2} \cdots x_{MP}]^T \quad (4)$$

式中:

$$x_{i1}(t) = x_{i2}(t - \Delta) = \cdots = x_{ip}(t - P\Delta + \Delta) \quad i = 1, 2, \cdots, M \quad (5)$$

$\Delta \leq T_c/2$, Δ 为时间延迟间隔,为信号的码元时间间隔。

将所有接收数据采样后,存储于 FPGA 的存储器中,以用来估计接收干扰信号的协方差矩阵。具体方式为:存储器的个数应等于空时数据处理的维数,即每一维空时接收的干扰数据利用一个存储器来存储,这样,就可以方便进行协方差矩阵的求取。而每个存储器的深度,则等于接收干扰数据的采样点数。深度越大,协方差的估计就越准确,但同时占用的存储器资源也就越多。

接下来,采用定点乘法器来计算接收干扰信号的自相关和互相关,其累加次数等于接收数据的采样点数。累加完成后,将整个矩阵除以采样点数,即得到估算的协方差矩阵。

得到协方差矩阵后,就可以根据式 1,进行迭代计算。具体的迭代过程如下:

- 1) 先将空时数据处理的维数 MP 分成若干段,每一段具有 m 个数据,并尽量使 $\log_2 m \approx MP/m$;

- 2) 进行 m 个系数和 m 个权值的乘法运算,同时,并行开展上一次权值更新时所得结果的累加运算,即求取包含前两次之前的所有 $m/2$ 个加法结果的和;
- 3) 进行 m 个系数和 m 个权值的乘法运算,同时在上述所得加法运算结果的基础上,继续进行加法运算,即求得包含前两次之前的所有 $m/4$ 个加法结果的和;
- 4) 按照上述规律,继续进行运算,求得包含前两次之前的所有 $m/8$ 个加法结果的和,直到本次权值运算中最后 m 个乘法结果与 m 个加法结果的和求取完毕,并且上一次权值运算结果的累加过程完毕为止。
- 5) 迭代结束后,输出权值。

利用这种迭代计算时,迭代次数越高,其结果越精确。对于高斯-赛德尔迭代法,在每一轮权值更新过程中,下一次权值更新总是及时使用了上一次权值更新结果,因此,迭代过程容易收敛,但并行实现能力并不强。将空时处理维数分成若干段后,段内进行简单迭代,段外则进行高斯-赛德尔迭代,此时算法的收敛性和并行性都得到了显著增强。

当接收端连续工作时,对于本算法而言,一种简单的考虑就是将连续的输入信号分成若干段,每一段均独立地求取抗干扰权值,也就是迭代计算的初始权值设为某一固定值。此时,利用每段数据进行迭代计算时,就无法利用上一段数据的权值来求取结果,造成计算资源的浪费。如果在使用每段数据开始迭代计算时,利用上段数据的权值计算结果作为本段数据的初始权值,则在抗干扰算法连续工作时,就能够有效地降低迭代次数,大幅度提高算法的执行效率。

4. 仿真结果

4.1. 静态干扰仿真结果

利用组合方法对不同静态干扰信号进行处理,并与采用单段迭代处理的结果进行对比。由仿真结果可以看出,不论是在在单个干扰条件下,还是两个干扰或三个干扰条件下,组合方法仿真处理结果都能很好的逼近单段迭代处理的结果,而组合方法的计算量和计算效率都大大提高,表明该方法在处理静态干扰时具有可行性。具体仿真结果如图 2 所示(组合方法中多段数据迭代时,每段数据迭代次数均为 128 次)。

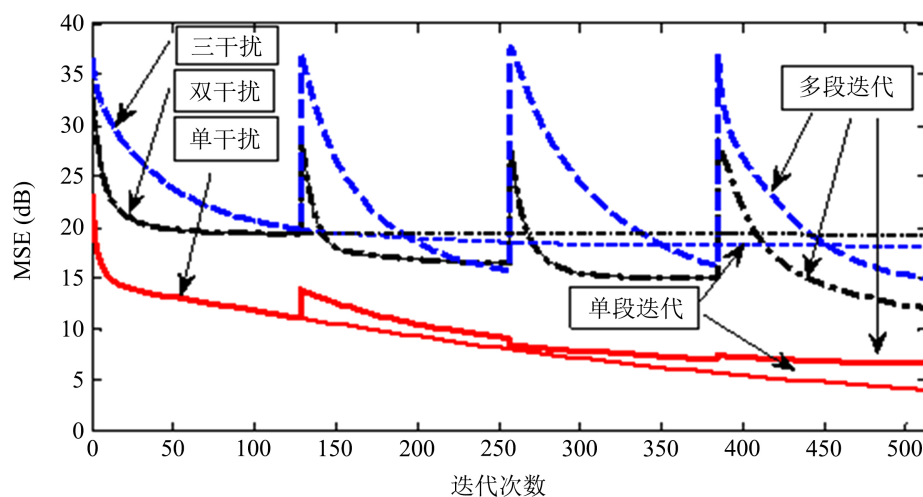


Figure 2. Performance comparison between single segment data iteration and multi segment data iteration in static state

图 2. 静态时单段数据迭代与多段数据迭代性能对比

4.2. 动态干扰仿真结果

利用组合方法对动态干扰信号进行处理, 仿真过程为: 首先利用组合方法对干扰信号进行处理, 处理结果收敛后, 依次改变干扰信号的功率、方向、个数等条件, 查看组合方法处理动态干扰信号的效率和精度。通过仿真结果可以看出, 组合方法能够快速收敛, 并与最优算法结果接近; 当干扰信号变化时, 组合方法能够快速收敛至新的条件下的最优算法结果; 当由单个干扰变为多个干扰时, 组合方法也能很好的逼近最优算法的结果。组合方法在采用 128 次迭代时的仿真结果如图 3 所示, 迭代次数增加时, 组合算法结果将更加接近最优算法结果。证明该组合方法在处理动态干扰时是可行的, 在保证处理精度的前提下, 提高了抗干扰处理的效率。

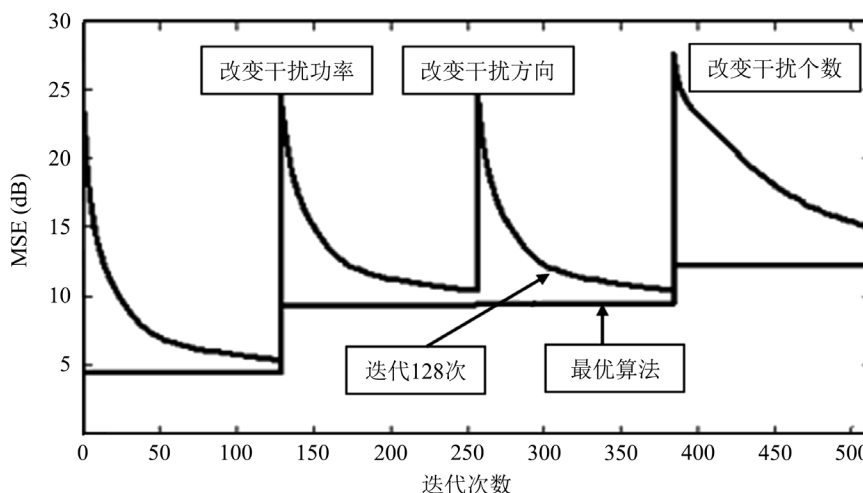


Figure 3. Comparison of iterative performance of multi segment data under dynamic conditions
图 3. 动态条件下多段数据迭代性能对比

5. 结论

针对空时联合抗干扰方法中存在的计算量大、难以适应复杂电磁环境干扰抑制等特点, 利用组合使用简单迭代法与高斯-赛德尔迭代法, 降低了计算量, 提高系统的时效性, 并通过仿真, 验证了简单迭代法与高斯-赛德尔迭代法组合方法的有效性, 实现了空时联合抗干扰计算的降维处理, 为空时联合抗干扰计算提供了参考。

参考文献

- [1] 郭艺, 张尔扬, 沈荣骏. 多步迭代降维方法研究[J]. 通信学报, 2007, 28(9): 68-73.
- [2] 曹建波. GPS 接收机降维空时联合处理算法研究[J]. 现代导航, 2014(3): 162-163.
- [3] 康博, 张新帅, 路明, 吴雅娟, 陈金令. 北斗空时抗干扰降维算法研究[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(6): 73-76.
- [4] 王霖郁, 杨旭, 项建弘. 基于多域联合处理的 MIMO 抗干扰技术[J]. 应用科技, 2019, 46(2): 42-46.
- [5] 王东昱, 马子儒. MIMO 系统下的空时正交分组的码的研究[J]. 数字技术与应用, 2017(3): 67-68.
- [6] 王永良, 吴志文, 彭应宁. 适于非均匀杂波环境的空时自适应处理方法[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 56-58.
- [7] 孙晓叔, 皇甫堪, 陈强, 李刚. GPS 接收机抗干扰空时自适应滤波方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 168-173.
- [8] 董李梅. 一种变步长自适应算法在 GPS 空时抗干扰中的应用[J]. 通信技术, 2015, 48(3): 295-297.
- [9] 刘斌, 何广军, 冯有前, 杨科, 许京伟. 静态和差波束匹配的空时自适应处理方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 138-143.