

GPS 接收机空时抗干扰滤波技术研究

宋文武^{1,2}, 张 凯²

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074;

2. 电磁兼容性国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 为提高 GPS 接收机信号实时处理能力, 提出自适应降秩滤波算法。即根据处理器性能对输入数据进行自适应分段, 以提高数据收敛速度; 然后对数据使用基于多级嵌套维纳滤波的迭代相关相减的快速降秩算法降低计算量。该技术能有效提高 GPS 接收机空时抗干扰滤波能力。基于实验结果, 文中对所述算法的抗干扰能力以及收敛特性进行了分析。

关键词: 维纳滤波; 抗干扰; 空时处理; 软件无线电; GPS

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7649(2010)07-0077-04 **DOI:**10.3404/j.issn.1672-7649.2010.07.014

Research on space time anti jam filtering technology for GPS receiver

SONG Wen-wu^{1,2}, ZHANG Kai²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on EMC, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to promote the real signal dealing ability of the GPS receiver, adaptive low-rank filtering algorithm is put in the paper. First auto segmented data-inputting algorithm based on the CPU dealing ability is adopted to promote the data convergence speed. Then the fast iterative correlation subtraction low-rank multistage winner filtering algorithm is proposed to lower the calculation amount in the paper. It can promote the filtering ability of the GPS receiver on space-time anti-jam. Based on some experimental results, the filtering ability and converge property of the algorithm discussed are analyzed finally.

Key words: Winner filtering; anti jam; space-time processing; software radio; GPS

0 引 言

全球定位系统(GPS)技术是利用 GPS 接收机, 接收来自于不同分布的卫星信号, 全天候提供精确的目标定位和准确的系统授时服务^[1]。目前, 通信、电力、测量、军事等行业已广泛应用 GPS 技术, 并取得了良好的经济效益。

由于 GPS 接收机接收到的卫星信号功率较弱, 同时它要面对高功率的来自于周围环境中的不同类型的干扰信号, 如连续波干扰信号、恒模干扰信号、宽带干扰信号和宽带循环平稳干扰信号等。为获得正

确的卫星信号, 需要对这些干扰信号进行有效抑制^[2]。目前, GPS 接收机主要的抗干扰技术有时域/频域滤波技术、空域滤波技术和空时自适应滤波技术等^[3]。其中空时自适应滤波技术以最优准则选取天线阵, 在不增加天线数情况下提高了天线自由度, 可有效抑制干扰信号。但空时处理技术对处理器的要求较高, 所要求的计算量较大, 因而降秩处理是关键技术, 经典的最小均方法(LMS)、递推最小二乘法(RLS)由于在大计算量条件下收敛性较慢或实时处理能力不强, 无法胜任 GPS 的抗干扰要求。

为解决 GPS 接收机空时抗干扰处理时计算量

收稿日期: 2010-05-04; 修回日期: 2010-05-25

作者简介: 宋文武(1963-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向为电磁干扰控制。

大、效率低的问题,本文提出根据处理器性能对输入数据进行自适应分段加快数据收敛速度,同时提出基于多级嵌套维纳滤波的迭代相关相减的快速降秩算法(MSNWFF)降低数据计算量。该算法可全面提高GPS接收机空时抗干扰滤波能力。

1 原理分析

1.1 自适应分段技术

图 1 为基于软件无线电的可对窄带干扰、宽带干扰、宽带循环平稳干扰信号等进行并行多级处理的结构示意图,其中快速傅立叶(FFT)频域滤波主要抑制窄带干扰信号,空时处理主要抑制宽带干扰信号,线性检测主要抑制宽带平稳干扰信号。

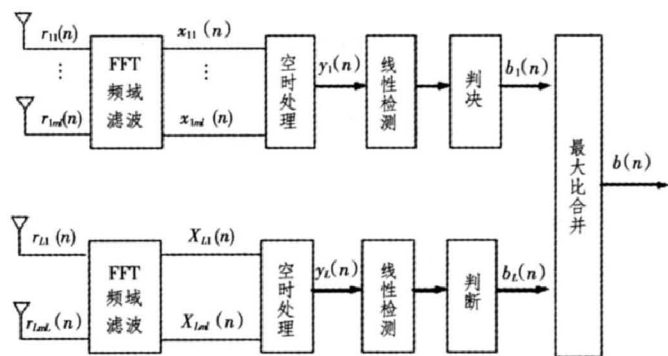


图 1 基于软件无线电的 GPS 接收机抗干扰处理示意图

Fig. 1 The schematic diagram of anti jam for GPS receiver based on software radio

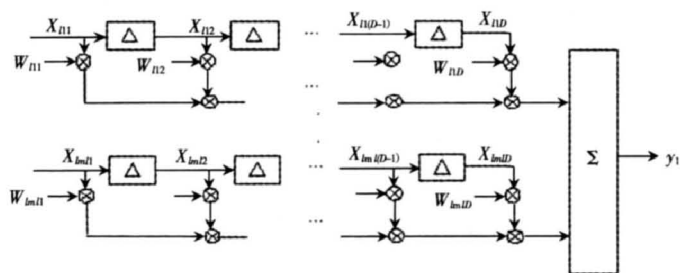


图 2 GPS 接收机空时抗干扰处理示意图

Fig. 2 The schematic diagram of processing of the GPS receiver on space-time anti-jam

图 1 中,空时处理技术以最优准则选取天线阵,在不增加天线数情况下提高了天线自由度,可有效抑制干扰信号。为提高空时数据的处理效率,将数据按采样时间顺序分段输入(如图 2):如果某级空时处理总的阵元数为 $ml(m=1, 2, 3, \dots; l=1, 2, \dots, L)$,时间延迟单元数为 D ,每个时间延迟单元的时间延迟为 $\delta(B\delta=1, B$ 为带宽),每个阵元时间延迟总长度为 $(D-1)\delta$ 。采样后 $MD \times 1$ 维离散化输入量为:

$$x_l^T(n) = [x_{n1}(n), \dots, x_{nD}(n), \dots, x_{ml}(n), \dots, x_{mD}(n)], n = 1, \dots, LD. \quad (1)$$

其中: $x_{m,l}(n)$ 表示某个数据段中第 l 行第 m 级阵元第 d 个延迟单元的第 n 个样本值 LD 为数据分段长度。

由式 (1) 构成的空时二维输入数据矩阵为:

$$X = [x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(LD)]^T. \quad (2)$$

如果处理器权矢量 $W, R = E[XX^T]$ 为接收数据的协方差矩阵,那么该处理器可描述为有约束最优化问题:

$$W = \arg \min W^H R W, \quad (3)$$

且

$$W^H H = 1.$$

其中: H 为二维导向矢量。

由拉格朗日乘子法得最优空时处理器的解为:

$$W^{OPT} = [H^H R H]^{-1} R^{-1} H. \quad (4)$$

1.2 降秩技术

式 (4) 中最优空时处理需要计算接收信号向量的相关矩阵,计算量大,多级嵌套维纳滤波算法(MSNWF)突破了矩阵求逆、相关矩阵特征分解思路,在同样阶次下,性能超出主成分法和互谱度量法,并且更稳健^[4]。为降低传统多级嵌套维纳滤波计算复杂性,针对其结构,目前许多学者在这方面进行了相关研究。相关相减算法可有效降低多级嵌套维纳滤波前向递推计算量(如图 3 所示)^[5];迭代法利用等效降秩变换后数据协方差矩阵的三对角特性,直接用迭代法求解后向维纳滤波器^[6]。

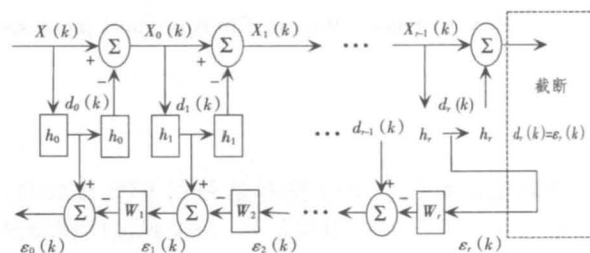


图 3 多级嵌套维纳滤波相关相减实现结构

Fig. 3 The realization structure of MSNWF

结合本文研究内容,提出多级嵌套维纳滤波的快速实现技术——迭代相关相减快速降秩法(MSNWFF),以实现数据处理总计算量较低,实时性处理提高的要求。该算法的实现结构如图 4 所示。该算法实现过程如下:

1) 向前迭代初始化

$$\sigma_{d0}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |d_0(k)|^2,$$

$$\delta_1 = \sqrt{r_{x_0 d_0}^H r_{x_0 d_0}},$$

$$h_1 = \frac{r_{x_1 d_1}}{\delta_1},$$

$$d_1(k) = h_1^H X_0(k),$$

$$\sigma_{d1}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |d_1(k)|^2,$$

$$X_1(k) = X_0(k) - h_1 d_1(k),$$

$$r_{x_1 d_1} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X_1(k) d_1^*(k),$$

$$A_1^{(1)} = \frac{1}{\sigma_{d1}^2},$$

$$\beta_1 = \sigma_{d1}^2.$$

2) 向前迭代

for $i = 2, N - 1$,

$$\delta_i = \sqrt{r_{x_{i-1} d_{i-1}}^H r_{x_{i-1} d_{i-1}}},$$

$$h_i = \frac{r_{x_i d_i}}{\delta_i},$$

$$d_i(k) = h_i^H X_{i-1}(k),$$

$$X_i(k) = X_{i-1}(k) - h_i d_i(k),$$

$$r_{x_i d_i} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X_i(k) d_i^*(k),$$

$$\sigma_{d_i}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |d_i(k)|^2,$$

$$\beta_i = \sigma_{d_i}^2 - \delta_i^2 \beta_{i-1}^{-1},$$

$$A_1^{(i)} = \begin{bmatrix} A_1^{(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix} + \beta_i^{-1} A_1^{(i-1)} \begin{bmatrix} \delta_i^2 A_{i-1}^{(i-1)} \\ -\delta_i \end{bmatrix},$$

$$A_i^{(i)} = \beta_i^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ -\delta_i A_{i-1}^{(i-1)} \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon A^{(i)} = \sigma_{d0}^2 - \delta_1^2 A_1^{(i)},$$

if $\varepsilon A^{(i)} < \varepsilon A_{\text{threshold}}$,

then $r = i$ 跳出,

end.

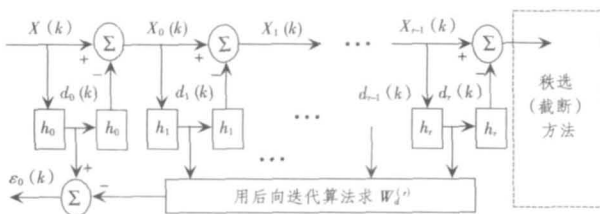


图 4 多级嵌套维纳滤波选带相关相减实现结构

Fig.4 The realization structure of MSNWF

3) 权值计算

$$T^{(i)} = [h_1, h_2, \dots, h_r],$$

$$W_{opt}^{(i)} = \delta_1 T^{(i)} A_1^{(i)}.$$

2 实验分析

2.1 空时抗干扰能力

图 5 显示的是 5 个阵单元的均匀线阵 (时延数为 5, 每个干扰器每元干噪比 J/N 为 20 dB, 信噪比 S/N 为 -25 dB), 在不同单频干扰、窄带干扰和宽带干扰数下, 分别在纯阵列处理和空时处理时的系统输出均方误差 MSE, 由图可见:

1) 纯阵列空域处理在干扰数大于 5, 输出 MSE 急剧增大, 说明其最大抗干扰数为 $M - 1$, 而单频干扰、窄带干扰下空时处理的 MSE 变化不大, 说明其抗干扰能力较强。

2) 宽带干扰数下, 在干扰数大于 5, 纯阵列处理和空时处理的输出 MSE 都急剧增大, 但后者的抗干

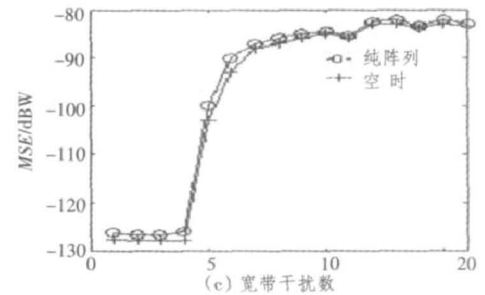
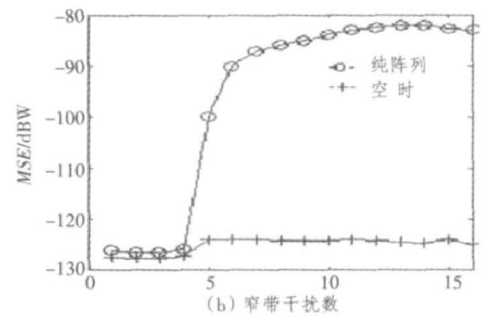
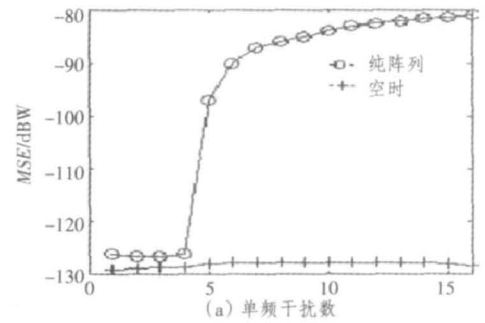


图 5 不同干扰数时系统 MSE 特性

Fig.5 The characteristic of MSE for different numbers of interference

2.2 空时滤波收敛分析

图 6 显示的是不同空时滤波处理方法下,采用 (2+3) 天线方式并联多级处理时的系统输出信干比 (SINR)。该时间延迟阵的阵元数为 5, 各阵元时间延迟单元数为 6, 自适应权值维数为 30, 系统输入信干噪比为 -60 dB。

由图 6 可见, MSNWFF 滤波方法收敛性能最好, MSNWF 收敛性能次之, RLS 收敛性能中等, LMS 收敛缓慢。

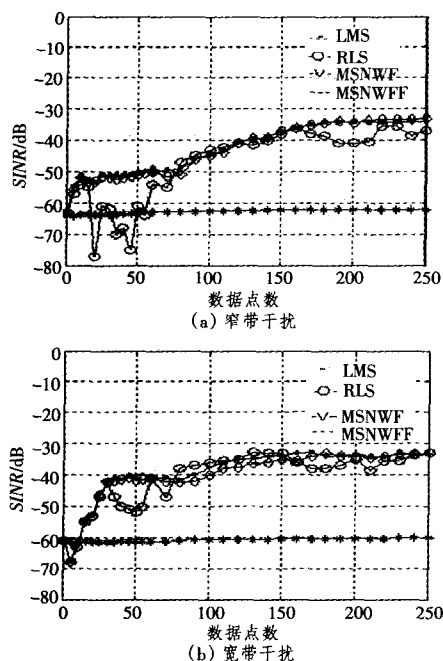


图 6 GPS 接收机抗干扰滤波分析

Fig. 6 The analysis of filtering ability of the GPS receiver on anti-jam

3 结 语

为提高 GPS 接收机性能, 本文研究了 GPS 接收机空时抗干扰滤波技术, 分析了 GPS 接收机空时信号处理特点, 提出了根据处理器性能对输入数据进行自适应分段以提高收敛速度, 同时提出基于多级嵌套维纳滤波的迭代相关相减的快速降秩算法, 降低数据计算量。上述处理可提高 GPS 接收机空时抗干扰滤波能力。分析表明, 该方法能有效提高 GPS 接收机空时处理效率, 满足系统性能改善的需要, 具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] KAPLAN E D. GPS 原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] FANTE R L, VACCRO J J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array [J]. IEEE Trans. on AES, 2000, 36(2): 549-564.
- [4] GOLDSTEIN J S, et al. A multistage presentation of the wiener filter based on orthogonal projections [J]. IEEE Trans. on Information theory, 1998, 44(7): 2943-2959.
- [5] RICKS D C, GOLDSTEIN J S. Efficient architectures for implementing adaptive algorithms [A]. Proceedings of the 2000 Antenna Applications Symposium, Allerton Park, Monticello, IL, 2000, 29-41.
- [6] JOHAM M, ZOLTOWSKI M D. Interpretation of the multistage nested Wiener filter in the Krylov subspace framework [R]. Tech Rep TUM-LANS-TR-00-6, Munich University of technology, 2000.

(上接第 67 页)

2) 无论是矢量水听器的声压通道还是质点振速通道, 其相关系数都随阵元间距的增大呈现出以贝塞尔函数形式振荡衰减的趋势。

3) 当考虑了海底、海面反射系数、海水吸收系数的时候, 矢量水听器的相关系数曲线仍将呈现振荡衰减的趋势, 但此时振荡的规律将变得不明显。

3 结 语

本文建立了噪声场的一般模型, 讨论了界面噪声场下声压、质点振速 3 个正交分量的空间相关特性, 并给出了相关系数的解析表达式。通过对这些解析表达式积分, 方便地解决矢量水听器通道之间相关特

性的求解问题, 对于矢量水听器成阵有指导作用。

参考文献:

- [1] CRON B F, SHERMAN C H. Spatial-correlation functions for various noise models [J]. J. Acoust. Soc. of Am., 1962, 34(11): 1732-1736.
- [2] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean [J]. J. Acoust. Soc. of Am., 1980, 67: 1988-1996.
- [3] HARRISON C H. Formulas for ambient noise level and coherence [J]. J. Acoust. Soc. of Am., 1996, 99(4): 2055-2066.
- [4] HAWKES M, NEHORAI A. Acoustic vector-sensor correlations in ambient noise [J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2001, 26: 337-347.