

强干扰环境下窄带信号检测滤波优化算法

朱文忠^{1,2}, 蒋华龙¹, 周述文¹

(1 四川理工学院 计算机学院, 四川 自贡 643000;

2 江河流域生态环境的集成感知与应用院士(专家)工作站, 四川 自贡 643000)

摘 要: 提出一种新的强干扰环境下窄带信号检测滤波算法, 通过检测滤波算法存在的问题, 建立强干扰环境下的信号模型, 对信号序列进行快速傅里叶变换及进行频域处理, 对经频域处理后的信号再此进行快速傅里叶变换, 获取频域中最强信号的幅度, 并进行能量归一化处理 and 逆向频移, 得到滤波后的原信号, 实现强干扰环境下窄带信号的检测滤波. 仿真实验结果表明, 采用所提方法进行窄带信号检测得到的信号质量好, 效率高.

关键词: 强干扰环境下; 窄带信号; 检测滤波

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0151-04

Strong Interference Environment Narrowband Signal
Detection Filter Optimization AlgorithmZHU Wen-zhong^{1,2}, JIANG Hua-long¹, ZHOU Shu-wen¹

(1 School of Computer Science Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2 Sichuan Provincial Academician (Expert) Workstation-Integrated Perception and
Application of Eco-Environment in River Basins, Zigong 643000, China)

Abstract: A new narrowband signal detection algorithm is put forward. The strong interference environment problems are solved by examining filtering algorithm, and strong interference environment signal model is set up. Fast Fourier transform of signal sequence and the frequency domain processing are finished. After the signal received the frequency domain processing, it experienced the fast Fourier transform, and the strongest signal amplitude was obtained. After filtering of the original signal, narrow-band signal was realized under strong interference environment detection filter. Simulation experimental results show that the proposed method is adopted to improve the narrowband signal detection of signals are of good quality and high efficiency.

Key words: strong interference environment; Narrowband signal; Detection of filter

1 引言

近年来, 随着科技和计算机的逐渐发展和广泛应用, 人们对信息安全的要求越来越高, 而对窄带信号进行检测滤波能够显著提高输出信号的质量, 在很大程度上可以避免噪声干扰^[1-5]. 因此, 研究强干扰环境下窄带信号检测滤波算法具有重要意义, 已经成为相关学者研究的重点课题^[6-8].

其中, 文献[9]采用窄带频域滤波器进行滤波的方法, 对主要集中在频域的一个很窄的范围内的窄带信号能量, 使用窄带频域滤波器进行滤波, 这需要关于噪声的先验知识, 并且计算量较大, 计算效率低, 无法有效实现强干扰环境下窄带信号检测滤波. 文献[10]虽然解决了文献 9 存在的弊端, 但是加入了大量的约束, 限制了其应用性. 文献[11]中, 对信号处理的过程过于复杂, 抵消了后期的优势. 文献

收稿日期: 2015-04-19; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 江河流域生态环境的集成感知与应用院士(专家)工作站(YSGZZ2015); 企业信息化与物联网测控技术四川省重点实验室(2014WYJ06, 2015WZJ01); 四川省智慧旅游研究基地(ZHZ14-02, ZHZ14-03)

[12]所用的方法能够较好地实现滤波,但是对于复杂环境下的信号过滤,无能为力,缺陷明显,无法实现强干扰环境下窄带信号检测滤波。

针对上述出现的问题,提出基于快速傅里叶变换的强干扰环境下窄带信号检测滤波算法,引入快速傅里叶变换对窄带信号进行处理,能够很好地去掉窄带信号存在的滤波。仿真实验结果表明,使用所提算法实行窄带信号监测获取的信号质量显著优于传统算法。

2 强干扰环境下窄带信号检测滤波算法的改进

2.1 强干扰环境下信号观测模型分析

针对上述窄带信号检测滤波算法存在的问题,需要进一步建立信号观察模型实行解析。使用 M 元平均线阵构建强干扰情况下的信号模型,建立像图 1 一样的坐标系, $1 \sim M$ 用来表示基阵阵元序列号。

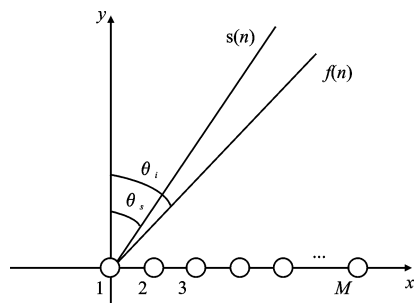


图 1 基阵坐标系

图 1 中,分别用 $s(n)$ 与 $I(n)$ 表示目标信号与强干扰信号,分别用 θ_s 与 θ_i 表示目标信号及强干扰信号的入射方位角。如果强干扰与目标都处在阵列的远场,同时信号从正前方 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的观察区域入射,那么强干扰信号与目标信号到达接收阵时能够当作是平面波。

获取 $s(n)$ 和 $I(n)$ 经希尔伯特转换后的复信号 $\tilde{s}(n)$ 和 $\tilde{I}(n)$,可用公式描述如下:

$$\begin{cases} \tilde{s}(n) = A_s \exp\{j(2\pi f_0 n + \varphi_s)\} \\ \tilde{I}(n) = A_i \exp\{j(2\pi f_0 n + \varphi_i)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_s 、 A_i 分别用于描述目标信号和强干扰信号的幅度,分别用 φ_s 、 φ_i 来表示目标信号与强干扰信号的原始相位,用 φ_i 来表示归一化信号频率, n 为离散采样时刻。

在得到复位目标信号 $\tilde{s}(n)$ 和强干扰信号

$\tilde{I}(n)$,计算出空间中共同存在目标和干扰时在 n 时刻阵列接收信号的时域快拍。假设检测环境的背景噪声是空时复高斯白噪声 $\tilde{w}(n)$,其均值与方差分别为 0 与 σ_n^2 。针对图 1,在 n 时刻阵列接收信号的时域快拍可描述成 $r(n) = [\tilde{r}_1(n), \tilde{r}_2(n), \dots, \tilde{r}_M(n)]^T$,其中, $\tilde{r}_M(n)$ 用于描述第 M 号阵元在 n 时刻的采样值,如果空间中共同存在目标和干扰,则

$$\tilde{r}(n) = \tilde{s}(n) + \tilde{I}(n) + \tilde{w}(n) \quad (2)$$

得到 $\tilde{r}(n)$ 、 $\tilde{s}(n)$ 、 $\tilde{I}(n)$ 之后还需引入一个基阵响应量,对 $\tilde{r}(n)$ 进行转换,获取信号观测模型。假设 1 号阵元是参考阵元,同时引入基阵响应向量 $v(\varphi) = [1, e^{-j\varphi}, \dots, e^{-j(M-1)\varphi}]^T$,其中, $\varphi = 2\pi f_c \cdot \tau(\theta)$, $\tau(\theta) = -d \cdot \sin\theta/c$, d 用于描述阵元间的距离; c 表示介质里的声速; θ 用来表示和信号有关基阵法线方向的入射方位角; f_c 用来表示信号频率,那么 $\tilde{s}(n)$ 、 $\tilde{I}(n)$ 能表示为:

$$\begin{cases} \tilde{s}(n) = \tilde{s}_1(n)v(\varphi_s) \\ \tilde{I}(n) = \tilde{I}_1(n)v(\varphi_i) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\varphi_s = 2\pi f_c \cdot \tau(\theta_s)$, $\varphi_i = 2\pi f_c \cdot \tau(\theta_i)$,将式(9)代入式(8)中,则有:

$$\tilde{r}(n) = \tilde{s}_1(n)v(\varphi_s) + \tilde{I}_1(n)v(\varphi_i) + \tilde{w}(n) \quad (4)$$

假设 $\tilde{s}_1(n) = A_s \exp\{j(2\pi f_0 n + \varphi_s)\}$, $\tilde{I}_1(n) = A_i \exp\{j(2\pi f_0 n + \varphi_i)\}$,同时假设 A_s 、 A_i 、 φ_s 、 φ_i 位置,其他参数均一致,则可将上式转换成:

$$\tilde{r}(n) = h(n) \cdot \Psi + \tilde{w}(n) \quad (5)$$

其中,

$$h(n) = \exp(j2\pi f_0 n) [v(\varphi_s)v(\varphi_i)], \quad \Psi = [\Psi_s, \Psi_i]^T, \quad \Psi_s = A_s \exp(j\varphi_s), \quad \Psi_i = A_i \exp(j\varphi_i).$$

Ψ 向量里包含目标信号与干扰信号所有未知参数。假如所有通道采样点数为 N ,则通过式(11)可获取信号观测模型,表达式如下所示:

$$\tilde{r} = H \cdot \Psi + \tilde{w} \quad (6)$$

2.2 窄带信号检测滤波的优化

在根据上述得到的信号观测模型对,典型窄带信号—正弦波进行分析,则叠加噪声的复正弦信号离散形式的初始最强信号如下:

$$\begin{aligned} x(n) &= s(n) + w(n)\tilde{r} = \\ &= b_0 \cdot \exp(j2\pi n f_0 / f_s) + w(n)\tilde{r} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, f_s 用于描述采样频率; b_0 用来表示信号幅度; f_0 用来表示信号频率; N 用来表示样本点数;

$s(n)$ 用来表示信号; $w(n)$ 用来表示零均值加性复高斯白噪声, 方差为 $2\sigma^2$ 。

获得初始最强信号之后, 要引入离散傅里叶变换理论, 进行处理。

通过对最强信号进行傅里叶变换处理之后, 可求出 $x(n)$ 的幅度。对任意离散傅里叶变换系数, 如果 $n = n_0 - r$, r 用于描述整数, 则 $x(n)$ 幅度可描述成:

$$|X(n_0 - r)| = \left| \frac{\sin(\delta\pi + r\pi)}{\sin\left(\frac{\pi}{N} \cdot (\delta + r)\right)} \right| \quad (8)$$

分析上式可知, 离散傅里叶变换系数 $|x(n)|$ 为 δ 与 r 的函数。

经大量研究表明, 如果 $\delta \neq 0$, 则离散傅里叶变换系数的幅度会随 $|r|$ 的增加而减小, 同时几乎所有离散傅里叶变换系数都不是 0。

在得到 $x(n)$ 幅度之后, 按照 Parseval 定理, 对其进行能量归一化和偏置, 来减少迭代次数, 达到检测滤波优化的目的。当前信号能量基本上所有分散于频域谱线上, 假如实行窄带监测滤波, 肯定会造成信号能量的消耗。则通带内信号归一化能量如下:

$$\eta = \sum_{k=k_1}^{k_1+p} |x(n)|^2 / \sum_{k=0}^{N-1} |x(n)|^2 \quad (9)$$

式中, k_1 用于描述通道初始地点; p 用来表示通带宽度。 η 的理想值为 1, 也就是频域滤波为带来信号能量的消耗。

伴随频域滤波窗宽度的慢慢增大, 通信里信号能量也在慢慢增加。在强干扰情况下, 跟着频域通带宽度的提高, 通带里噪声也慢慢提高。所以, 如果 $\delta = 0$ 或 $\delta \rightarrow 0$, 也就是信号频率是量化频率的整数倍, 那么使用很窄的频域滤波窗就能根本囊括所有信号能量, 也就是 $\eta \approx 1$, 同时可最大程度的抑制噪声的干扰。

因为 $f_0/\Delta f = n_0 + \delta$, 也就是 $f_0 = (n_0 + \delta) \cdot \Delta f$, 则对信号进行频域处理, 之后的表达式为

$$\tilde{f}_0 = f_0 - \delta \cdot \Delta f = n_0 + \Delta f \quad (10)$$

则频偏后的信号频率是 $\tilde{f}_0$ 量化频率的整数倍, $\tilde{f}_0$ 对量化频率的频偏 $\tilde{\delta}$ 可描述成:

$$\tilde{\delta} = \langle \tilde{f}_0 / \Delta f \rangle = 0 \quad (11)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 代表取余运算。利用上述分析, 针对频率是 $\tilde{f}_0$ 的信号进行窄带滤波。实际应用中, 频偏 $\tilde{f}_0$ 可通过下式求出:

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{|x_{0.5}| - |x_{-0.5}|}{|x_{0.5}| + |x_{-0.5}|} \quad (12)$$

进行逆向频移之后, 得到滤波后的原信号为

$$X_{\pm 0.5} = \sum_{k=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi m \cdot \frac{n_0 \pm 0.5}{N}} \quad (13)$$

该方法仅需很窄的频域窗函数则可保留全部信号能量, 无需大量的迭代处理, 减少了检测滤波时间, 提高了检测的准确度。

3 仿真实验分析

为了证明本文提出的基于快速傅里叶变换的强干扰环境下窄带信号检测滤波算法的有用性, 须要实行有关的实验解析。实验将传统方法作为对比实验进行仿真。具体实验环境如下: CPU 为 P43.0, 内存为 2 GB, 操作系统为 Windows XP, 编程语言为 C++。经检测滤波后窄带信号的质量可通过输出信噪比和归一化偏差进行衡量。

分别采用本文算法和传统算法对强干扰环境下窄带信号进行检测滤波, 采样信号像如图 2 所示。

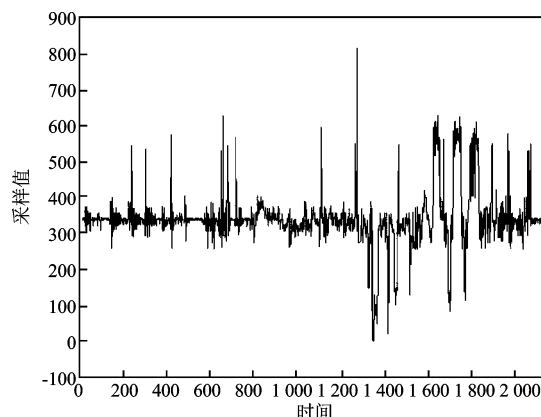


图2 原始采样信号 A

在原始采样信号的基础上, 对数据压缩算法的性能实行评价, 定义衡量目标如下所示。

(1) 压缩比 CR

$$CR = \frac{N_c}{N} \times 100\%,$$

式中, N_c 为最终保留的小波系数长度; N 为原始信号的长度。

(2) 信噪比 SNR

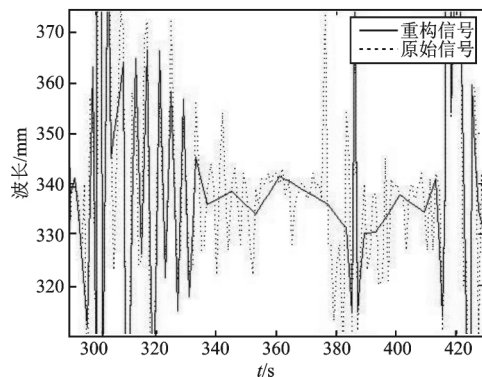
$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N |f(i)|^2}{\sum_{i=1}^N |f(i) - \bar{f}(i)|^2},$$

式中, 分别用 $f(i)$ 与 $\bar{f}(i)$ 表示原始与解压缩之后的信号。

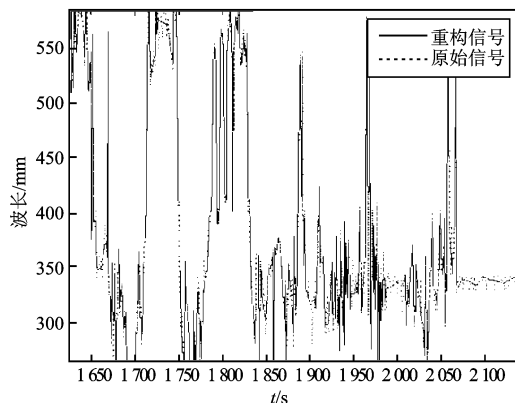
压缩比为测量压缩效率的一个关键指标, 反映了压缩后的数据和原数据的比。这个值越小, 压缩效

率就越高. 而信噪比反映了原始信号和重构信号的相似度. 相似度越大, 表明有压缩后信号的消耗越小.

输出信噪比越高, 说明经检测滤波后的输出信号和不含噪声信号序列越接近, 检测滤波效果越好. 采用不同方法进行信号重构并对比, 获得结果如图 3 所示.



(a) 本文方法



(b) 对比方法

图 3 不同方法的信号重构对比

分析图 3 可以看出, 采用本文算法得到的信噪比明显高于传统算法, 且一直高于传统算法, 说明经本文算法处理后的输出信号质量更高, 验证了本文算法的有效性.

得到的信噪比的统计结果如图 4 所示. 分别采用本文算法和传统算法对强干扰环境下窄带信号进行检测滤波, 得到的归一化偏差结果如图 5 所示.

归一化偏差是输出信号与不含噪声信号序列之间差别的体现, 归一化偏差越低, 说明经检测滤波后的输出信号和不含噪声信号序列越接近, 输出信号质量越高. 分析图 5 可以看出, 采用本文算法对窄带信号进行检测滤波, 得到的归一化偏差显著低于传统算法, 进一步验证了本文算法的有效性.

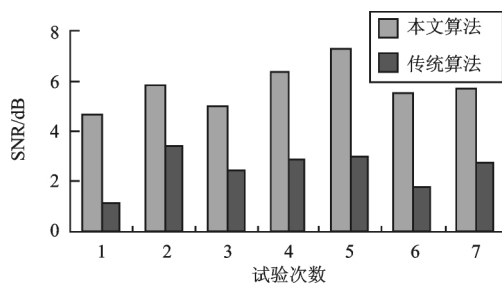


图 4 两种方法信噪比较结果

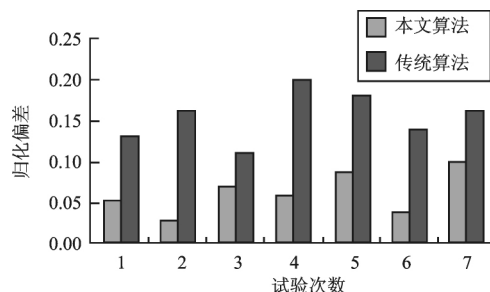


图 5 两种方法归一化偏差比较结果

4 结束语

针对传统方法存在的检测效率低、滤波不好的问题, 提出一种基于快速傅里叶变换的强干扰环境下窄带信号检测滤波算法, 通过强干扰环境下的信号模型, 对信号序列进行快速傅里叶变换, 估计信号频偏, 将信号进行频域处理, 对经频域处理后的信号实行快速傅里叶转变, 在频域里实行窄带滤波治理, 获得滤波后的频域样本, 重建时域信号, 对其进行逆向频移, 得到滤波后的原信号, 实现强干扰环境下窄带信号的检测滤波. 仿真实验结果表明, 采用所提方法进行窄带信号检测得到的信号质量好、效率高.

参考文献:

- [1] 李实锋, 王玉林, 华宇, 等. 罗兰-C 信号的抗干扰快速检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 91-94.
- [2] 曹龙, 方娟, 马强. 基于 FPGA 的窄带干扰抑制算法在 GPS 中的应用[J]. 电子设计工程, 2013, 21(17): 174-177.
- [3] 李献斌, 王跃科, 杨俊. 级联陷波器抗窄带干扰设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 492-497.
- [4] 简晓龙, 何文涛, 徐建华, 等. 卫星导航接收机中窄带干扰抑制算法[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 72-75.
- [5] 文洪涛, 杨燕明, 刘贞文, 等. 小波尺度相关滤波及其改进算法在电火花声源信号处理中的应用[J]. 声学学报, 2013, 25(6): 707-714.

(下转第 158 页)

等多款采用 SPARC V8 架构的 SOC/SiP 嵌入式操作系统的开发工作中,效果良好.

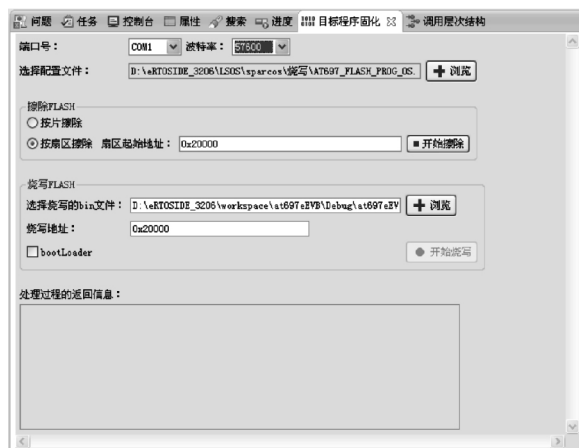


图 7 Nor Flash 编程软件的用户界面

5 结束语

基于 DSU 的 Nor Flash 通用在线编程方法与原有方法相比具有通用性好,操作简单的特点,极大的提高了 Flash 的编程效率.随着 DSU 片上调试单元的大量使用,直接利用 DSU 单元进行 Flash 编程,不失为一种可行的方法,对配备 DSU 接口的处理器芯片的 Flash 编程具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] Atmel Corporation. Rad-Hard 32bit SPARC V8 Processor AT697E, Rev. 4226F-AERO-02/09 [R]. San Jose, CA, USA; Atmel Corporation, 2006.
- [2] Aeroflex Gaisler AB. LEON/GRLIB configuration and development guide[R]. Kungsgatan 12 411 19, Goteborg, Sweden; Aeroflex Gaisler, 2012.
- [3] 何勇,王腾,王新安,等.一种低代价零开销 SoC 在线调试系统设计[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(3): 89-93.
- [4] 张鹏,樊晓桢,黄小平.基于总线访问的片上调试方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(2): 510-512.
- [5] GAISLER RESEARCH AB. GRMON user's manual, version 1. 1. 27b[R]. Kungsgatan 12 411 19, Goteborg, Sweden; Aeroflex Gaisler, 2008.
- [6] Spansion. S29GL-N mirror bit flash family data sheet, S29GL-N_01_11[R]. Sunnyvale, CA 94085, USA; Spansion Inc, 2008.

作者简介:

焦 淼 女, (1989-), 硕士. 研究方向为系统软件设计.

E-mail: chengl654321@126. com.

袁成军 男, (1960-), 本科, 研究员. 研究方向为系统软件设计.

(上接第 154 页)

- [6] 莫小鹏,梁光明,敖宇,等.一种改进的双门限窄带干扰抑制算法[J]. 数字技术与应用, 2013, 19(10): 133-135.
- [7] 刘鑫,刘涛.基于 DFT 的扩频信号抗窄带干扰算法的分析与仿真[J]. 电子质量, 2013, 33(7): 19-23.
- [8] 张宇辉,段伟润,李天云.局部放电信号中抑制周期性窄带干扰的逆向分离方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 232-239.
- [9] 程高远,吕明.一种 OFDM 系统强窄带干扰消除方法[J]. 电子科技, 2013, 26(12): 50-52.
- [10] 郭淑霞,刘孟江,董中要,等.北斗导航系统上行注入链路窄带干扰抑制分析[J]. 微处理机, 2013, 34(4): 37-40.

[11] 陆成刚.信号检测算法的迭代式串接增强策略[J]计算机科学, 2014, 41(6): 324-325.

[12] 谢涛,曹军威,廉小亲.混沌振子弱信号检测系统构成及相应速度研究[J]计算机工程与应用, 2015, 51(9): 16-21.

作者简介:

朱文忠 男, (1971-), 硕士研究生, 教授. 研究领域为计算机技术. E-mail: zwz@suse. edu. cn

蒋华龙 男, (1969-), 副教授. 研究方向为物联网技术.

周述文 男, (1973-), 副教授. 研究方向为智能旅游和计算机应用技术