

权值反馈的多干扰频域自适应滤波

杨晓梅* 李德玉 汪天富 郑昌琼

(四川大学生物医学工程系 成都 610065)

【摘要】针对多个不等强度的大功率窄带干扰,提出了一种权值反馈的频域自适应滤波算法。其优点是利用权值反馈不仅在权值迭代过程中实时调整更新步长,实现算法的快速收敛,同时达到有效地抑制多个强干扰的目的,使输出信号的平均功率更接近于扩频信号功率,改善了DSSS系统的性能。同时将算法的数学推导和分析与无权值反馈自适应滤波算法进行了比较,仿真结果验证了该算法在加快收敛速度以及改善系统性能方面的有效性。

关键词 权值反馈; 窄带干扰抑制; 自适应滤波; 扩频通信

中图分类号 TN973.3⁺2 **文献标识码** A

A Weight-Feedback Frequency Domain Adaptive Filtering Algorithm for Multi-Narrowband Interference Suppression

Yang Xiaome Li Deyu Wang Tianfu Zheng Chanqiong

(Department of Biomedical Engineering Center, Sichuan University Chendu 610065)

Abstract A weight-feedback frequency domain adaptive filtering algorithm is proposed in this paper to suppress multi-narrowband interference. Using feedback weight adjusts timely the step during iterating procedure, fastens convergence rate of frequency adaptive filtering. Similarly this method can also achieve the purpose of suppressing interference and improving the performance of DSSS system. Compared with non-feedback frequency adaptive filtering, Mathematical derivation and computer simulation results are presented to validity of the proposed algorithm.

Key words weight feedback; multi-narrowband interference suppression; adaptive filtering; spread spectrum

在DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)系统中,虽然它固有的扩频增益可以提供一定的抗干扰性能,但若干扰强度超出扩频增益所能提供的抑制能力时,则需借助于干扰抑制技术来改善DSSS的性能。通常是在接收信号与本地PN码进行解扩之前,插入一个抑制窄带干扰的滤波器,尽管引入了少量的DS信号的畸变,但能有效地滤除大部分的窄带干扰能量。

干扰抑制方法既可在时域也可在频域中进行。时域滤波常采用LMS的自适应算法^[1],该算法将窄带信号看作确定性正弦信号,采用滤波器预测窄带干扰信号,从接收信号中消去。当系统受多个窄带干扰影响时,输入信号的功率增加以及相关矩阵特征值的分散会引起算法的收敛性能大为降低,从而限制了时域滤波在多窄带干扰抑制方面的应用。而频域的自适应滤波^[2-5],利用FFT的正交特性,将输入信号分解为几乎彼此独立的各个分量,单阶滤波器相互独立地作用于各个频率分量,滤波算法的收敛速度与干扰的个数无关,即对输入信号相关矩阵的特征值分散不敏感,改善了算法的收敛特性。另外频域自适应滤波常采用批处理方法,计算量比时域自适应滤波算法的计算量要小。

2002年8月29日收稿

* 女 29岁 博士生 主要从事图像处理与图像传输方面的研究

1 频域自适应滤波算法

频域自适应滤波器的基本结构如图1所示。将时域接收信号重新组织成 N 个连续采样点 $\{x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)\}$ 为一组的块数据 $x(k)$ ，对每一数据块进行FFT变换，得到 $\{X_1(k), X_2(k), \dots, X_N(k)\}$ 。FFT变换将时域信号投影为几乎独立的频域信号，频域滤波方法则是借助自适应方法对各个独立的频率分量进行权值的迭代更新，权值具有对强信号敏感，而对弱信号不敏感的特点。随着迭代次数的增加，强干扰信号的频谱不断地迭代抵消，最终受到大幅度的抑制，而扩频信号作为弱信号得以保留。权值更新迭代式表示为

$$W_l(k+1) = aW_l(k) + 2m[1 - W_l(k)]X_l(k)X_l^*(k) = aW_l(k) + 2m[1 - W_l(k)]\|X_l(k)\|^2 \quad (1)$$

式中 $X_l(k)$ 是第 k 块 N 维频域输入向量 $X(k)$ 的 l 分量， $W_l(k+1)$ 和 $W_l(k)$ 分别是更新后和更新前的权值， m 为权值更新步长， a 为权值泄露因子且 $a \in (0,1)$ ， $(\cdot)^*$ 表示复数共轭。 l 频率分量的误差信号 $e_l(k)$ 由下式得出

$$e_l(k) = X_l(k) - W_l(k)X_l(k) = [1 - W_l(k)]X_l(k) \quad (2)$$

从式(1)得知，式中右边的第二项权值增量与当前权值和输入信号的功率谱 $X_l(k)X_l^*(k)$ 有关，通常为实数，意味着权值本身也是实数。经过足够长的迭代次数， $W_l(k)$ 将与幅度谱的平方成正比。在强干扰信号所占有的频带内， $\|X_l(k)\|^2$ 具有很大的数值，权值最终将收敛于1，而弱信号由于 $\|X_l(k)\|^2$ 很小，其权值几乎收敛于0。若用加权因子 $(1 - W_l(k))$ 与 $X_l(k)$ 相乘，强干扰信号的频谱得以全部滤除而被大幅度地抑制，对弱信号则为全通得以保留。

为使权值收敛，对式(1)两边求取数学期望值，可推出权值步长必须满足

$$|a - 2ms_l^2| < 1 \quad (3)$$

式中 s_l^2 是输入信号功率。由于要同时满足 $m > 0$ ，则

$$m \in \left(0, \frac{1+a}{2s_l^2}\right) \quad (4)$$

引入输出功率门限因子

$$B = \frac{(1-a)}{(2m)} \quad (5)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时，权值 $W_l(k)$ 将收敛于下式为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{W_l(k)\} = \frac{2ms_l^2}{1-a+2ms_l^2} = \frac{s_l^2}{s_l^2 + B} \quad (6)$$

若 B 一定， $W_l(k)$ 的收敛值将随着 s^2 的增加而增加，对于 s^2 大的强信号， $W_l(k)$ 将收敛于1。输出信号功率即误差信号功率由下式得出

$$P_{(out)l}(k) = [1 - W_l(k)]s_l^2 \quad (7)$$

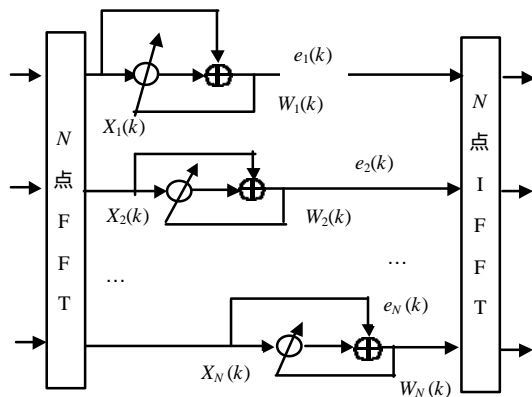


图1 频域自适应滤波

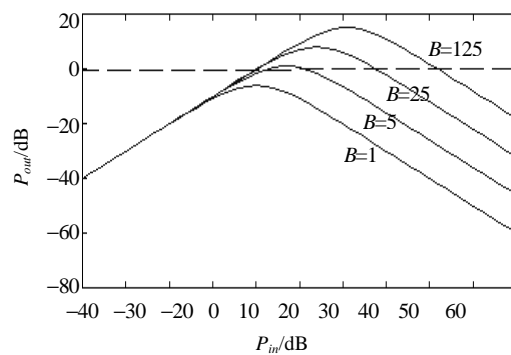


图2 参数 B 与输入、输出信号功率的关系

且收敛于

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_{out}(k) = \frac{B^2 s_i^2}{(s_i^2 + B)^2} \quad (8)$$

如图2所示, 图中描述了门限 B 与输出信号功率 P_{out} 间的关系。门限因子 B 决定了被保留或被抑制输入信号功率的门限, 当输入信号功率 P_{in} 高于此门限时, 输出被抑制, 否则被保留。对于一定功率的干扰信号, 可通过合理选择 B 来加以抑制。

2 权值反馈的频域自适应滤波算法

当输入信号中存在强干扰信号时, 即 s_i^2 很大, 为确保权值收敛, 由式(4)得知步长 m 应取得很小, 而算法的收敛速度很大程度上取决于步长 m 的选择, m 小的值会使收敛时间延长。由式(5)得知, m 值小则门限 B 很大。当强干扰和弱干扰(对于扩频信号而言认为强信号)同时存在时, 在同一门限 B 的作用下, 如 $B=25$, 从图2可知, 功率大于20 dB的强干扰得到了抑制, 而功率在0~10 dB间的弱干扰几乎被保留下来, 没有得到有效的抑制, 输出信号功率增加。

以上讨论的值 m 小所带来的收敛速度缓慢和弱干扰信号得不到有效抑制的现象, 该文提出了一种权值反馈的自适应滤波算法。该算法利用前一次迭代求取的权值, 对当前输入信号首先执行滤波处理抑制强干扰信号, 如式(9)所示, 滤波输出信号 $\bar{X}_i(k)$ 作为频域自适应滤波器的输入信号进行权值的迭代更新。

$$\bar{X}_i(k) = (1 - W(k-1))X_i(k) \quad (9)$$

将式(9)代入式(1)中可得

$$W_i(k+1) = aW_i(k) + 2m[1 - W_i(k)]\|\bar{X}_i(k)\|^2 = aW_i(k) + 2[m/(1 - W_i(k-1))^2][1 - W_i(k)]\|X_i(k)\|^2 \quad (10)$$

比较式(10)和式(1)可知, 当步长 $\bar{m} = m/(1 - W_i(k-1))^2$, 而 $0 < (1 - W_i(k-1))^2 < 1$, 即步长 \bar{m} 增加, 从而加快了收敛速度, 并且每一次的迭代中 \bar{m} 都是满足收敛条件的。为确保权值收敛, 无权值反馈的滤波算法中步长 m 是根据式(4)来选择后得出

$$m < \frac{1+a}{2s_i^2} \quad (11)$$

对式(9)两边求取幅度谱功率可得

$$s_i^2(k) = \frac{\overline{s_i^2(k)}}{[1 - W_i(k-1)]^2} \quad (12)$$

将式(11)中的 s_i^2 用式(12)替换得 $m < \frac{1+a}{2 \frac{\overline{s_i^2(k)}}{[1 - W_i(k-1)]^2}}$

$$\text{即} \quad \frac{m}{[1 - W_i(k-1)]^2} < \frac{1+a}{s_i^2(k)} \quad (13)$$

上式左侧项即为当前迭代的步长 \bar{m} , 也满足 $\bar{m} < (1+a)/s_i^2$ 的条件。同时随着步长的增加, 门限因子 B 减小, 由图2得知, 弱干扰信号也得到了有效的抑制。同时, 为避免 B 的减小, 使得扩频信号也被抑制, 在算法中引入输出功率阈值 P_s , 来判断干扰信号的存在。其算法步骤如下:

- 1) 确定权值泄露因子 $a \in (0,1)$ 和输出信号功率阈值 P_s , P_s 的选取与扩频和噪声信号功率有关;
- 2) 用FFT计算输入信号的频谱 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, 其中 N 为FFT的点数。为确保权值收敛, 第一次迭代时, 选取初始步长 $m < (1+a)/2\|X_i\|_{\max}^2$ 。

3) 当 $k=1$ 时, 有 $\bar{X}_i(k) = X_i(k)(k=1)$; 当 $k > 1$ 时, 若 $MP_{out}(k) > P_s$, 表明存在干扰信号, 由式(9)计算 $\bar{X}_i(k)$ 作为频域滤波器的输入信号; 若 $MP_{out}(k) < P_s$, 表明不存在干扰信号, 跳转到步骤式(6)中; 其中 MP_{out} 为输出平均功率, 并按式(14)计算;

- 4) 根据式(10)进行 $k+1$ 次的权值迭代更新 $W_i(k+1)$;
- 5) 根据式(2)计算误差信号 $e_i(k)$, 即为滤波输出信号 ;
- 6) 计算输出信号的平均功率为

$$MP_{out}(k+1) = \sum_{i=1}^N e_i^2(k) \quad (14)$$

- 7) 对频域输出信号进行IFFT, 得到时域的输出信号, 对下一组块数据, 返回到步骤式(3)中进行迭代。

在算法中采用FFT的批处理方式, 由于频率分辨率的问题在幅度谱特性中引入了旁瓣。而频域的多窄带干扰抑制算法中, 权值更新对旁瓣也非常敏感, 会使滤波器在抑制窄带干扰相应频率能量的同时, 也会滤去周围旁瓣中实际扩频信号的能量。当存在多个干扰信号时, 扩频信号的能量被大量地滤除, 造成扩频信号很大程度的失真, 使后续的PN序列解扩运算变得相当困难。因此有必要抑制旁瓣效应, 与“矩形”窗函数相比, “Hamming窗”函数在输入信号的起始和终止端引入平滑的衰减信号, 使干扰能量积聚在较小的频率范围内, 为此在步骤(2)之前对时域的输入信号作“加窗”处理, 再进行FFT变换。

3 系统仿真

系统仿真框图如图3所示。DSSS系统的扩频增益为63, BPSK调制产生扩频信号 $s(t)$, 平均功率为0dB, 信道中叠加白噪声 $n(t)$ 和多个不等强度的窄带干扰 $j_m(t)$, 接收信号 $r(t)$ 表示为

$$r(t) = s(t) + n(t) + \sum_{m=1}^M j_m(t) = s(t) + n(t) + \sum_{m=1}^M \sqrt{2P_m} \cos((w_0 + s_m w_0)t + q_m) \quad (15)$$

式中 P_m 为第 m 个干扰信号的功率, w_0 为载波频率, $s_m w_0$ 为干扰信号与载波频率之间的频率偏差, q 为在 $(0, 2\pi)$ 区间随机分布的变量。

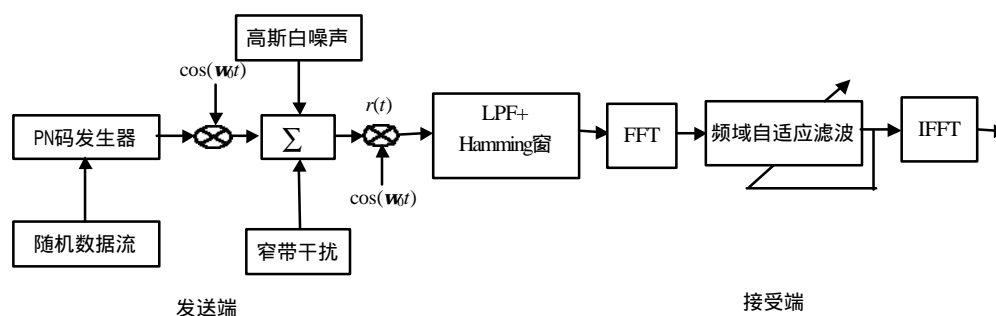


图3 系统仿真框图

为了评估文中提出的权值反馈自适应算法的有效性, 用输出平均功率 MP_{out} 和权值两参数与无反馈的频域自适应算法进行比较。如图4所示, 图(a)为经LPF(低通滤波器)和Hamming窗处理后含有4个不等强度窄带干扰的扩频信号频谱, 横坐标用FFT的点数来代替频率, 实际的频率可转换为 $n/256 * f_s$, ($n=0 \sim 256$, f_s 为采样频率)最大和最小信干比分别为-60 dB和-30 dB, 干扰占信号总频谱带宽20%。图(b)为迭代次数 $k=5$ 时, 有反馈时的权值; 图(c)为在相同迭代次数下无反馈时的权值。从比较两图得知, 有反馈的算法无论是相当强或相对弱的干扰都比无反馈的滤波算法以较快的速度趋近于1。图(d)为通过测量输出信号的平均功率获得的上述两种算法的收敛特性, 图(e)为输出平均率放大, 放大图(d)纵坐标获得的输出信号功率。由图可见, 权值反馈自适应滤波算法的收敛速度比无权值反馈滤波算法的收敛速度快, 且输出平均功率更接近于扩频信号的功率。

4 结论

本文所述的权值反馈频域自适应滤波算法, 在多个不等强度强干扰存在的情形下, 不仅加快了频域自适应滤波算法的收敛速度, 同时也有效地抑制了多个强窄带干扰的影响, 改善了DSSS系统的性能。利用权值反馈增快迭代步长, 对算法进行了数学推导, 也对改进后的算法进行了分析与讨论, 仿真结果验证了算法的有效性, 并具有一定的实用价值。

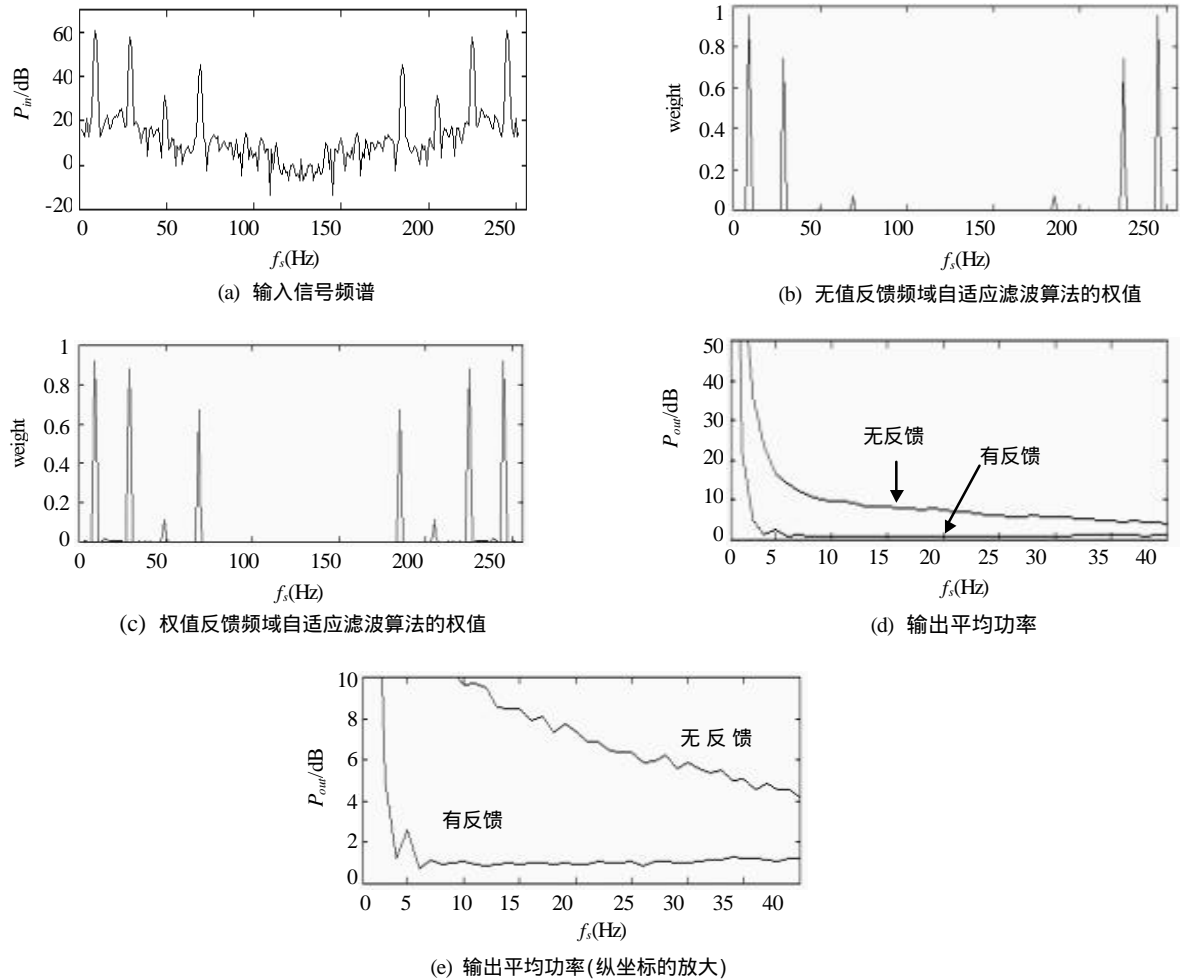


图4 计算机仿真结果

参 考 文 献

- [1] Simon Haykin. Adaptive Filter Theory. Prentice Hall, 1996
- [2] K H Li , Alex KOT. Performance of rejection Filters in DS Spread-Spectrum Systems. IEEE SINGAPORE ICCS/' 94: 359-362
- [3] Gary J. Saulnier. Suppression of Narrowband Jammers in a Spread-Spectrum Receiver Using Transform-Domain Adaptive Filtering. IEEE Journal on Selected Areas in Commun.vol.10,No.4.May 1992: 742-748
- [4]Mauro Dentino, John McCool, Bernard Widrow. Adaptive Filtering in the Frequency Domain. Proceeding of the IEEE, 1978, 66(12): 1 658-1 659
- [5] Chenshu Wang and Moeness G.Amin. Performance Analysis of Instantaneous Frequency-Based Interference Excision Techniques in Spread Spectrum Communication. IEEE trans on Signal Processing. 1998, 46(1): 70-82

编 辑 刘文珍