

一种抑制直扩通信窄带干扰的新型非线性自适应预测滤波器

黄高勇 张家树

(西南交通大学信号与信息处理四川省重点实验室 成都 610031)

摘要: 为了更有效地抑制直接序列扩频通信中的窄带干扰, 论文提出了一种非线性 Laguerre 滤波抑制直扩频通信窄带干扰的方法, 给出相应的自适应算法。该方法利用具有 IIR 和 FIR 滤波器特点的 Laguerre 时延单元构造非线性自适应预测滤波器。该方法可以使预测器的记忆深度与预测器的阶数解耦, 以更少的阶数达到更优的抑制性能。仿真实验结果表明: 与 Vijayan 和 Poor 传统非线性自适应预测滤波器相比, 该滤波器能够保证均方误差的收敛稳定性, 并能在信噪比改善提高 1-2dB 的前提下, 使滤波器阶数降低为原来的 1/3~1/5, 具有一定的现实意义。

关键词: 自适应滤波; 直接序列扩频; 窄带干扰抑制; 非线性 Laguerre 滤波器

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1328-04

A Novel Nonlinear Adaptive Prediction Filter for Narrowband Interference Suppression in DS-SS Communication

Huang Gao-yong Zhang Jia-shu

(Signal and Information Processing Key Lab. of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A novel nonlinear adaptive prediction approach based on truncated Laguerre memory structure is proposed to effectively suppress NarrowBand Interference (NBI) in Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). The memory depth can be uncoupled with the filter orders. Simulation results show that the proposed nonlinear adaptive prediction scheme outperforms the other exiting nonlinear adaptive prediction methods for the NBI suppression in DSSS, and the orders of the proposed filter can be largely reduced 3-5 times than that of Vijayan and Poor's filters.

Key words: Adaptive filtering; Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS); Narrowband interference suppression; Nonlinear laguerre filter

1 引言

直接序列扩频(DSSS)通信技术除了具有隐蔽性好、保密性强、抗多径衰落等特性外, 还可以有效地抑制信道中的窄带干扰^[1,2]。由于扩频带宽的限制, 当扩频增益不能提供足够的干扰抑制时, 就需要采用相应的窄带干扰抑制技术以提高 DSSS 系统的抗干扰能力。

在众多的窄带干扰抑制方法中, 时域自适应干扰抑制技术具有实现简单、抗干扰性能好等优点而受到人们的广泛重视^[3-7]。当背景噪声是高斯噪声时, 线性预测方法是最佳的^[3,4]。由于直接扩频序列是独立同分布的二进制序列, 这种序列是非高斯的, 由信号滤波理论可知, 在非高斯和高斯背景下的最优滤波是非线性的^[5]。为此, Vijayan 和 Poor^[5]提出了扩频通信抗窄带干扰抑制的非线性自适应预测滤波方法, 用最小均方算法(LMS)更新滤波器的抽头系数, 能较好地预测窄带干扰信号, 从而提高了系统的性能。由于扩频信号 $s(k)$ 是以等概率取 ± 1 , 均方误差收敛过程受 $s(k)$ 的影响而

加剧了抖动, 为了减轻 $s(k)$ 的影响, 文献[6]采用软判决方法对抽头向量自适应更新方程进行了改进, 提出了一种基于软判决的改进的非线性自适应最小均方算法, 解决了均方误差收敛的抖动问题, 但其计算复杂度仍然较高。为了降低算法的复杂度, Wu 和 Yu 提出了一种直接判决非线性自适应最小均方算法^[7], 在一定程度上降低了算法的复杂度。由于传统延迟单元 Z^{-1} 的记忆深度不够, 从而造成非线性自适应滤波器的阶数很高、算法实现复杂, 而滤波器的阶数过高也会造成自适应过程对系统模型的过参数估计问题, 降低了抑制性能。

Laguerre 滤波器兼有 FIR 和 IIR 滤波器的优点, 既可以以少参数模拟长脉冲响应, 避免过参数估计问题, 又可以保证收敛的稳定性^[8]。针对上述问题, 本文将 Laguerre 延迟节引入 Vijayan 和 Poor 构造的非线性自适应预测滤波器结构, 构建了一种基于 Laguerre 横向结构的非线性自适应预测滤波器, 将其应用到直接序列扩频通信中抑制窄带干扰。对单音干扰和自回归(AR)模型干扰^[5-7]仿真研究结果表明: (1) 该滤波器能够有效保证均方误差的收敛稳定性, 进一步提高信噪比改善性能; (2) 并能大大降低滤波器设计的复杂性, 具有一定的现实意义。

2005-10-17 收到, 2006-05-08 改回

电子科技大学抗干扰通信重点实验室基金(51434110104QT2201); 国家自然科学基金(60572027)和教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-05-0794)资助课题

2 非线性自适应 Laguerre 滤波器

2.1 接收信号模型

直接扩频调制波形的低通等价形式^[5-7]表示为

$$m(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} c_k q(t - kT_c) \quad (1)$$

其中 N_c 为扩频增益, T_c 为切普间隔, c_k 为 PN 序列第 k 个切普, $q(t)$ 是周期为 T_c 的矩形脉冲。

$$s(t) = \sum_k b_k m(t - kT_b) \quad (2)$$

其中 b_k 为二进制符号序列, $T_b = N_c T_c$ 为比特周期。接收信号定义如下:

$$z(t) = \alpha s(t - \tau) + n(t) + i(t) \quad (3)$$

其中 α 为衰减因子, τ 延迟偏移量, $n(t)$ 为环境高斯白噪声, $i(t)$ 为窄带干扰。为了符号简化, 通常假定 $\tau=0, \alpha=1$ 。将接收信号经过一个切普匹配滤波器进行切普同步采样, 接收信号的离散采样信号的等价表达式为

$$z(k) = s(k) + n(k) + i(k) \quad (4)$$

其中 $\{s(k)\}, \{n(k)\}$ 和 $\{i(k)\}$ 分别为 $\{s(t)\}, \{n(t)\}$ 和 $\{i(t)\}$ 的采样时间序列。已有研究表明^[5-7], $\{s(k)\}, \{n(k)\}$ 和 $\{i(k)\}$ 三者之间相互独立, $\{s(k)\}$ 为以等概率取值 ± 1 的独立同分布的二进制序列。

2.2 基于 Laguerre 时延单元的非线性自适应横向结构滤波器

由于 Vijayan 和 Poor 的非线性自适应横向结构滤波器中延迟单元 Z^{-1} 的记忆深度不足, 往往导致滤波器的阶数很高, 一方面会使滤波器的实现复杂性高, 另一方面会导致对系统模型的过参数估计问题。为了解决这个问题, 用具有 IIR 和 FIR 滤波器特点的 Laguerre 时延单元取代非线性横向滤波器中的延迟单元 Z^{-1} , 构建了一种基于 Laguerre 横向结构的非线性自适应预测滤波器, 如图 1 所示, 以期降低 Vijayan 和 Poor 构造的非线性自适应预测滤波器的实现复杂性, 提高抗干扰能力。

在图 1 所示的结构, $\rho(\cdot)$ 表示非线性处理单元, 虚线框 A 部分为窄带干扰预测器, A 中的虚线框 B 所示部分为一个记忆深度大于 1 的 Laguerre 延迟节, 即用一单极点低通滤波网络 $L_0(z)$ 和单极点全通网络 $L(z)$ 级联所组成的 Laguerre 横向延迟节代替 Vijayan 和 Poor 的非线性自适应横向结构滤波器中延迟单元 z^{-1} 。这些 Laguerre 延迟节网络具有无限冲

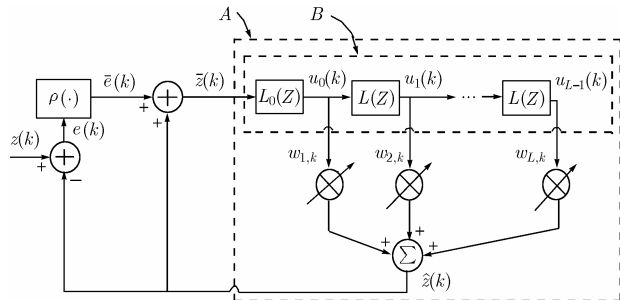


图 1 基于 Laguerre 横向结构的非线性自适应预测滤波器

激响应(IIR)特征, 其转移函数为

$$L_0(z) = \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}}, \quad 0 < a < 1 \quad (5)$$

$$L(z) = \frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}}, \quad 0 < a < 1 \quad (6)$$

第 i 个 Laguerre 横向延迟节的抽头输出处的转移函数为

$$L_i(z) = \sqrt{1-a^2} \frac{(z^{-1}-a)^i}{(1-az^{-1})^{i+1}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 当极点 $0 < a < 1$ 时, Laguerre 横向滤波器是稳定的。图 2 绘出了针对给定的 3 个极点参数 a 所对应的式(7)所表示的转移函数的幅频响应曲线($i=2$), 从中可以看出当 $0 < a < 1$ 时, 通过调节参数 a 改变了模型的记忆深度, 从而可以使模型的记忆深度不受滤波器的阶数控制; 该 Laguerre 预测滤波器对低频部分增加了记忆深度, 而滤除了高频部分信息。由此可见, 当感兴趣的信号集中在低频部分时, 通过调节 Laguerre 滤波器的极点参数 a , 改变滤波器的记忆深度, 可以有效地增强滤波效果。

由于扩频信号解调后在基带的窄带干扰信号能量绝大多数集中在低频部分, 因此, 应用这种基于 Laguerre 结构的非线性自适应滤波器来抑制扩频通信中的窄带干扰时, 可通过适当调节极点参数 a 来改变滤波器的记忆深度, 从而能够有效地降低滤波器的阶数, 提高扩频通信系统的抗干扰性能。

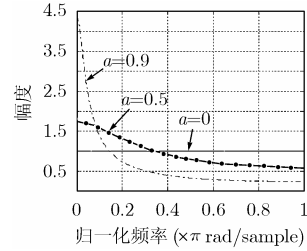


图 2 转移函数 $L_2(z)$ 的幅频响应曲线

2.3 自适应算法

在时域非线性自适应窄带干扰抑制技术中, 人们广泛采用归一化 LMS 算法^[5-7]来确定滤波器的抽头系数。相应地, 基于 Laguerre 延迟节的非线性自适应窄带干扰抑制的归一化 LMS 算法可描述如下:

预测误差信号 $e(k)$ 可以表示为

$$e(k) = z(k) - \hat{z}(k) \quad (8)$$

$$\hat{z}(k) = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (9)$$

Laguerre 延迟节的抽头输出信号可以递归方式得到, 即

$$u_0(k) = au_0(k-1) + \sqrt{1-a^2}z(k-1) \quad (10)$$

$$u_m(k) = u_{m-1}(k-1) + a[u_m(k-1) - u_{m-1}(k)], \quad 1 \leq m \leq L-1 \quad (11)$$

其中

$$\bar{z}(k) = \rho(e(k)) + \hat{z}(k) \quad (12)$$

$$\rho(e(k)) = e(k) - \text{sgn}(e(k)) \quad (13)$$

大量仿真表明: 采用硬判决方法比软判决方法^[5]能够大大降低算法的复杂度, 提高算法的收敛速度, 而在信噪比改善性能上与采用软判决接近^[7], 故此非线性函数 $\rho(e(k))$ 采用硬

判决方法。

对应的抽头权值向量更新方程为

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \frac{\mu}{P_k + \delta} \rho(e(k)) \mathbf{X}_k \quad (14)$$

其中 μ 为收敛因子, δ 为一个大于零的常量。 P_k 为输入信号的功率估计, 可以通过下式对 P_k 进行递归估计^[9]:

$$P_k = (1 - \gamma)P_{k-1} + \gamma \|\mathbf{X}_k\|^2 \quad (15)$$

$\mathbf{W}_k = [w_{1,k} \ w_{2,k} \ \dots \ w_{L,k}]^T$ 为抽头系数向量, $\mathbf{X}_k = [u_0(k) \ u_1(k) \ \dots \ u_{L-1}(k)]^T$ 为抽头输出向量, γ 为遗忘因子。

3 计算机仿真

为了验证本文方法的有效性, 按文献[5]中的单音干扰和自回归模型干扰, 采用信噪比改善因子 $\text{SNR}_{\text{impro}}$ 来衡量窄带干扰抑制的性能, 分别对文献[5-7]、线性自适应LMS窄带干扰抑制算法(LLMS)与本文的方法进行了计算机仿真研究。假定输入和输出信噪比分别表示为 SNR_{in} 和 SNR_{out} , 信噪比改善因子 $\text{SNR}_{\text{impro}}$ 定义为

$$\text{SNR}_{\text{in}} = 10 \lg \frac{E(|s(k)|^2)}{E(|z(k) - s(k)|^2)} \quad (16)$$

$$\text{SNR}_{\text{out}} = 10 \lg \frac{E(|s(k)|^2)}{E(|e(k) - s(k)|^2)} \quad (17)$$

$$\text{SNR}_{\text{impro}} = 10 \lg \frac{E(|z(k) - s(k)|^2)}{E(|e(k) - s(k)|^2)} \quad (18)$$

3.1 单音干扰时的仿真结果

单音干扰信号表示为

$$i(k) = A \cos(\omega k + \theta) \quad (19)$$

其中 A 为单音干扰的幅值, $\omega = 0.15$ 为单音干扰相对中心频率的干扰频偏, θ 为 $[0, 2\pi)$ 上均匀分布的随机相位, 环境噪声的功率 $\sigma_n^2 = 0.01$ 。每次独立仿真实验取平稳后的 4000 个样点, 每 500 个样点计算一次信噪比改善。10 次独立仿真求平均得到的数据处理结果示于表 1。其中, Taps 表示滤波器的阶数。

从表 1 对单音干扰抑制的仿真结果可知: 采用本文方法只需 3 个抽头就比文献[7]基于传统延迟单元的直接判决非线性自适应算法在 10 个和 15 个抽头时信噪比改善性能提高 1~2dB, 大大降低了滤波器的实现阶数, 同时信噪比改善性能也有了进一步的提高。

3.2 AR 模型信号干扰时的仿真结果

AR 模型窄带干扰信号由高斯白噪声经过二阶 AR 滤波器, 表示为

$$i(k) = 1.98i(k-1) - 0.9801i(k-2) + n_0(k) \quad (20)$$

其中 $n_0(k)$ 为输入滤波器的高斯白噪声。10 次独立仿真求平均得到的数据处理结果示于表 2。其中, Taps 表示滤波器的阶数。

从表 2 给出的抑制 AR 模型信号干扰结果可知: 采用本文方法同样只需 3 个抽头比文献[7]用 10 个抽头时的信噪比

表 1 单音干扰下计算机模拟结果

输入信噪比 SRN_{in} (dB)	信噪比改善 $\text{SRN}_{\text{impro}}$ (dB)									
	LLMS		文献[5]的方法		文献[6]的方法		文献[7]的方法		本文方法	
	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=3;	Taps=3;
-30	33.796	36.04	40.725	41.147	47.769	48.723	47.916	48.679	48.975	$a=0.9$
-25	28.744	31.048	35.659	36.194	42.853	43.516	43.052	43.757	44.086	
-20	23.811	26.061	30.715	31.108	38.056	38.563	38.12	38.655	39.037	
-15	18.775	20.895	25.991	26.172	33.133	33.538	33.092	33.794	34.07	
-10	13.695	15.333	21.268	21.395	28.195	28.839	28.284	28.887	29.046	
-5	9.1895	10.323	17.091	16.825	23.349	23.895	23.32	23.975	24.204	
0	5.2981	5.7513	13.464	12.779	18.292	19.107	18.436	18.94	19.2	

表 2 AR 模型信号干扰下计算机模拟结果

输入信噪比 SRN_{in} (dB)	信噪比改善 $\text{SRN}_{\text{impro}}$ (dB)									
	LLMS		文献[5]的方法		文献[6]的方法		文献[7]的方法		本文方法	
	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=10	Taps=15	Taps=3;	Taps=3;
-30	32.987	33.117	38.15	36.421	42.313	40.172	42.38	39.575	44.207	$a=0.4$
-25	29.207	29.32	35.766	35.337	40.081	38.846	40.214	38.753	41.007	
-20	25.479	24.904	31.927	31.687	36.752	36.079	37.014	36.275	36.994	
-15	21.575	20.948	27.616	27.467	32.659	32.468	32.713	32.67	32.372	
-10	17.394	16.996	23.409	23.232	28.136	28.267	28.043	28.395	27.975	
-5	13.054	12.588	19.945	19.264	23.573	23.638	23.597	23.676	23.543	
0	8.7252	7.8704	15.948	15.543	18.928	18.994	19.015	18.968	19.021	

改善性能提高了 1~2dB, 尤其是在输入信噪比较低时, 本算法的优越性更加明显; 此外, 当其它方法的抽头数为 15 时, 信噪比改善性能反而降低, 这是由于滤波器阶数太高而与被模拟系统参数不匹配所引起的, 进一步说明了本文构造的非线性自适应预测滤波器的有效性。

总之, 采用本文构造的非线性自适应 Laguerre 滤波方案, 无论是抑制单音干扰, 还是自回归模型窄带干扰信号, 均能提供更好的信噪比改善性能, 尤其是抑制强窄带干扰时的性能更好, 并且能够大大降低预测滤波器的实现阶数。

3.3 关于 Laguerre 延迟节极点参数 a 的选择问题

由于非线性Laguerre滤波器中包含了一个低通滤波延迟节, Laguerre延迟节极点参数 a 的不同选择可能影响信噪比改善因子 SNR_{impro} 。对Laguerre滤波器的极点参数 a 的选择问题, Silva^[10]描述了一种离线最优优化准则, 然而采用这种准则在一定程度上会降低Laguerre滤波器的收敛速度^[11]。为此, 在本文的极点参数 a 的选择仿真研究中, 按照最小均方误差准则来选取 a 的最佳值。图 3 和图 4 给出Laguerre延迟节极点参数 a 的不同选择与信噪比改善因子 SNR_{impro} 的仿真结果。

图 3 所示为单音情况下, 在输入信噪比分别为 -30, -25, -20 和 -15dB 以及抽头个数为 3 时的信噪比改善随参数 a 变化的曲线。从图中可以看出, 当参数 a 从 0 变化到 0.9 时, 信噪比改善随 a 的增加而增大, 仿真中选取 $a=0.9$ 。图 4 是在 AR 模型窄带干扰, 在输入信噪比分别 -30, -25, -20 和 -15dB 以及抽头个数为 3 时的信噪比改善随参数 a 变化的曲线。从图中可以看出, 当参数 a 在 [0.15 0.5] 之间时, 信噪比改善整体性能较好, 仿真中选取 $a=0.4$ 。

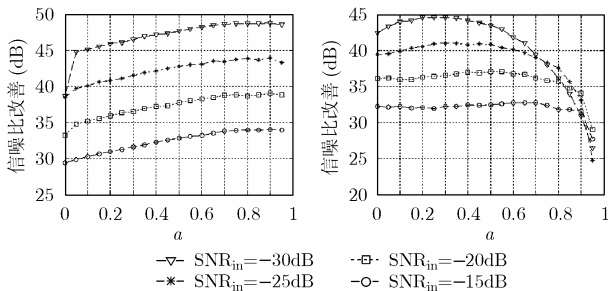


图 3 单音干扰时信噪比改善随 a 变化曲线

图 4 AR 干扰时信噪比改善随 a 变化曲线

4 结束语

本文构造了一种抑制直扩通信窄带干扰的非线性 Laguerre 横向预测滤波器, 并给出了一种基于该结构的直接判决非线性自适应 LMS 算法。按文献 [5] 中的单音干扰和 AR 模型干扰, 采用信噪比改善因子 SNR_{impro} 来衡量窄带干扰抑制的性能, 分别对文献 [5-7]、线性自适应 LMS 窄带干扰抑

结果表明, 该预测滤波器能够有效保证均方误差的收敛稳定性; 单音干扰和 AR 干扰条件下, 该预测滤波器的信噪比改善性能比文献 [7] 所提出的方法提高 1~2dB, 而滤波器阶数降为原来的 1/3-1/5, 大大降低了设计复杂性, 具有一定的现实意义。

参考文献

- [1] Pickholtz R L, Schilling D L, and Milstein L B. Theory of spread spectrum communications-a tutorial[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1982, 30(5): 855-884.
- [2] Schilling D L, Pickholtz R L, and Milstein L B. Spread spectrum goes commercial[J]. *IEEE Spectrum*, 1990, 27(8): 40-41, 44-45.
- [3] Masry E. Closed-form analytical results for the rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum system(Pt I): Linear prediction filters[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1984, 32(8): 888-896.
- [4] Masry E. Closed-form analytical results for the rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum system(Pt II): Linear interpolation filters[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1985, 33(1): 10-19.
- [5] Vijayan R and Poor H V. Nonlinear technique for interference suppression in spread spectrum systems[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1990, 38(7): 1060-1065.
- [6] 仇佩亮, 郑树生, 姚庆栋. 扩频通信中干扰抑制的自适应非线性滤波技术[J]. *通信学报*, 1995, 16(2): 20-28.
- [7] Wu W R and Yu F F. New nonlinear algorithms for estimating and suppressing narrow band interference in DS spread spectrum systems[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1996, 44(4): 508-515.
- [8] 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 160.
- [9] Haykin S 著, 郑宝玉等译. 自适应滤波器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 258.
- [10] Silva T O. On the determination of the optimal pole position of laguerre filters[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(9): 2079-2087.
- [11] Fejzo Z and Lev-Ari H. Adaptive Laguerre-lattice filters[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(12): 3006-3016.

黄高勇: 男, 1980 年生, 博士生, 助教, 研究方向为通信信号处理、无线通信。
 张家树: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性自适应信号处理、通信理论与信息对抗、多媒体信息工程等。

制算法(LLMS)与本文的方法进行了计算机仿真研究。研究