

一种改进的非线性窄带干扰抑制技术

马文强 陈豪

(中国空间技术研究院 504 所 西安 710000)

摘要 针对 Volterra 非线性信号处理技术所要求的计算量大的特点, 该文提出了一种改进的非线性 Volterra 滤波技术, 用于扩频通信中干扰抑制。与常规 Volterra 滤波算法相比, 改进算法能大大减小 Volterra 滤波器的长度, 从而使计算量大幅下降。仿真结果验证了该算法的优越性。

关键词 扩频通信, 干扰抑制, Volterra 滤波器, 自适应滤波

中图分类号: TN914.42 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2006)04-0690-03

An Improved Nonlinear Technology of Narrow-Band Interference Suppression

Ma Wen-qiang Chen Hao

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, the Chinese Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract An improved nonlinear technology of narrow-band interference suppression in DSSS communications is proposed. Compared with other Volterra filters, the algorithm proposed here can largely reduce the computational weight in a very simple way. Based on this algorithm, a DSSS receiver based on Volterra filters is investigated and simulation result proves its advantages.

Key words DSSS, Interference suppression, Volterra filters, Adaptive filtering

1 引言

扩频通信系统中, 基于 Volterra 滤波技术的扩频接收机在抑制窄带干扰和宽带干扰方面表现出非常好的性能, 它能大大提高系统的输出信干比, 从而降低接收机的误码率^[1]。Volterra 滤波的核心即接收信号的预处理技术。接收信号首先经过 Volterra 函数进行扩展, 然后再对扩展后的信号进行处理。但随之而来的是计算量增加的问题。常用的 Volterra 滤波一般取到 Volterra 级数的三阶, Volterra 滤波器的计算量随所选信号观测窗口长度的增加呈指数增长, 这极大地限制了 Volterra 滤波器的应用。同时, 在利用 Volterra 滤波器抑制扩频信号中的干扰时, 为了充分利用已知条件, 所选接收数据观测窗口的长度往往等于伪随机序列的长度或者特定的部分长度, 在所用伪随机序列长度较长的情况下, 采用 Volterra 滤波器的可能性几乎为零。如何在不减小所选接收数据观测窗口长度的前提下进一步减小 Volterra 滤波器的计算量, 是一个值得研究的问题。基于此, Bernardini^[2], Miroslav^[3], Panicker^[4]等人提出了一些优化 Volterra Filters (VF) 算法。但这些优化算法一般都是在特定的应用场合比较有效。

本文重点研究了 VF 在 CDMA 通信干扰抑制中的应用问题, 在分析其系数分布的基础上, 提出了一种优化 VF 算

法, 即“门限 VF(TVF)”算法。与其它优化 VF 算法相比, TVF 直接对其系数按一定的规则进行取舍, 从而大大减小其计算量, 同时对滤波性能的影响非常小。仿真结果验证了所提算法的优越性。

2 Volterra 扩频接收机模型

Volterra 扩频接收机模型如图 1 所示, 其中, L 表示扩频码的长度。

接收信号 $X(t)$ 如式(1)所示:

$$X(t) = s(t) + I(t) + n(t) \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 为期望信号(SOI), $I(t)$ 为干扰信号, $n(t)$ 为噪声(高斯或非高斯)。采用 BPSK 调制的 DSSS 信号可以用下式表示:

$$s(t) = U \cdot p(t)d(t)\cos(w_0t)$$

式中 U 为幅度, $p(t)$ 和 $d(t)$ 分别表示扩频码和有用信息, w_0 为载波频率。

本文中采用的窄带干扰模型为二阶 AR 模型: $I(n) + a_1I(n-1) + a_2I(n-2) = e(n)$, 其中 $e(n)$ 即均值为 0, 方差为 σ_e^2 的高斯随机过程。

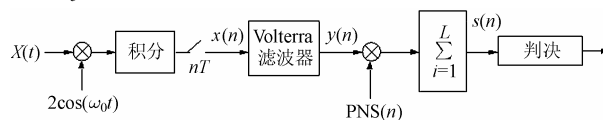


图 1 Volterra 扩频接收机框图

2.1 Volterra 滤波器

Volterra 滤波器是在 Volterra 泛函级数的基础上提出的。Volterra 泛函级数的表示式如式(2)所示。其中 D 为阶数， N 为基级的长度， h 称为级数的核。

$$y(n) = h_0 + \sum_{k=1}^D \sum_{\tau_1=1}^{N-1} \sum_{\tau_2=0}^{N-1} \dots \sum_{\tau_k=0}^{N-1} h_k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) \cdot x(n-\tau_1)x(n-\tau_2) \dots x(n-\tau_k) \quad (2)$$

出于计算量的考虑，现有的 Volterra 滤波器一般取到三阶，即 $D=3$ 。此时对应的 Volterra 滤波器的表达式可以用式(3)表示

$$y(n) = h_0 + \sum_{i=0}^{N-1} h_1(i)x(n+i) + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} h_2(i, j)x(n+i)x(n+j) + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} h_3(i, j, k)x(n+i)x(n+j)x(n+k) \quad (3)$$

其中 $\{h_1, h_2, h_3\}$ 为滤波器的系数， h_0 为信号的直流分量。一般而言，信号都可以经过预处理使其均值为 0，不失一般性，这里假设 $h_0 = 0$ ，即

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h_1(i)x(n+i) + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} h_2(i, j)x(n+i)x(n+j) + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} h_3(i, j, k)x(n+i)x(n+j)x(n+k) \quad (4)$$

式(4)即为 Volterra 扩展式。在 Volterra 滤波器中，首先将接收信号按式(4)进行扩展，然后再对扩展后的序列进行处理。典型的 Volterra 滤波器可以用图 2 所示框图表示。扩展过程可以用图 3 来表示。接收信号 $x(n)$ 经 Volterra 扩展后的 $x_{ex}(n)$ 包含 3 个部分，分别对应一次、二次和三次项。式(4)中的 h_1, h_2 和 h_3 即为各项对应的系数。系数优化算法可以用 LMS 或者 RLS 算法，但 RLS 算法的收敛速度明显优于 LMS 算法的收敛速度。

对 Volterra 滤波器的系数和输入采用向量的形式。

$$\mathbf{H} = [h_1(0), h_1(1), \dots, h_1(N-1), h_2(0,0), h_2(0,1), \dots, h_2(N-1, N-1), h_3(0,0,0), h_3(0,0,1), h_3(0,0,2), \dots, h_3(N-1, N-1, N-1)]^T$$

$$\mathbf{X}_V(n) = [x(n), x(n+1), \dots, x(n+N-1), x^2(n), x(n)x(n+1), \dots, x^2(N-1), x^3(n), x^2(n)x(n+1), x^2(n)x(n+2), \dots, x^3(n+N-1)]^T$$

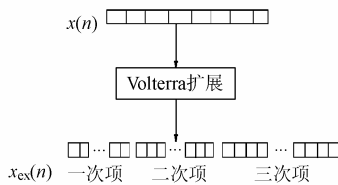
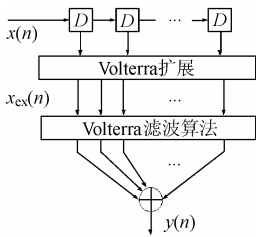


图 2 Volterra 滤波器原理框图 图 3 三阶 Volterra 扩展框图

此时，滤波器的输出也可以写成向量形式：

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_V^T(n) \quad (5)$$

滤波器的输出可以看作其系数的线性组合，这是 Volterra 滤波器的一个显著特点。

与推导最小二乘法自适应滤波器的正则方程相似，可以推导出 Volterra 滤波器基于 MMSE 准则的正则方程，即

$$\mathbf{R}_V \mathbf{H}_V = \mathbf{P}_V$$

其中 $\mathbf{P}_V = E\{d(n)x_V(n)\}$ ， $d(n)$ 为参考信号； \mathbf{R}_V 为输入信号的 Volterra 自相关矩阵，即 $\mathbf{R}_V = x_V^T x_V$ 。

2.2 优化 Volterra 算法

上述 Volterra 算法在扩频接收机的干扰抑制中取得了较好的效果，但其计算量也非常大。已有的 Volterra 优化算法大部分都是以改变信号组合顺序为基础，但这并不能从根本上减小滤波器的长度。仿真中发现，当 Volterra 滤波器处于稳态时，其系数中有相当一部分非常小。这些系数对滤波器输出的贡献也非常小，这样就可以对滤波器的系数设置一个门限，小于这个门限的系数全部置零。这样就可以降低 Volterra 滤波器的维数，减小计算量。这里称这种算法为“门限 VF(TVF)”算法，此算法的关键之处在于图 4 所示的门限控制器。滤波器的系数稳定时，首先对其系数进行统计，将统计的结果反馈回门限控制器单元，门限控制器根据所得信息自适应地选择合适门限，在满足一定误码率的条件下，将滤波器的长度减到最小。

普通 VF 中可以采用计算接收信号自相关矩阵的方法来计算最佳滤波器系数，但 TVF 中由于采用了门限截断的方式限制滤波器的长度，此时计算其相关矩阵相对困难。本文中采用自适应算法来获取最佳 TVF 滤波器系数。

门限控制器的输出用下式表示：

$$\mathbf{X}_{ex1}(n) = [x_{ex1}(n), x_{ex1}(n+1), x_{ex1}(n+2), \dots, x_{ex1}(n+M-1)]$$

其中 M 表示滤波器的长度，此时对应的滤波器系数为

$$\mathbf{H}_1(n) = [h_1(n), h_1(n+1), h_1(n+2), \dots, h_1(n+M-1)]$$

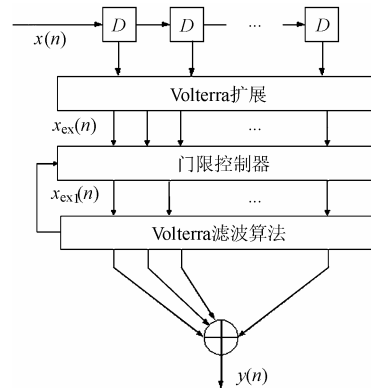


图 4 门限 Volterra 滤波器框图

采用 LMS 算法，系数更新过程为

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{X}_{ex1}^T(n) \mathbf{H}_1(n)$$

$$\mathbf{H}_1(n+1) = \mathbf{H}_1(n) + \mu \mathbf{e}(n) \mathbf{X}_{ex1}(n)$$

其中 $\mathbf{e}(n)$ 为期望值和输出值之间的误差， μ 为步长， $\mathbf{d}(n)$ 为

参考信号。仿真表明,与VF相比,TVF的长度可以减小三分之一左右,计算量的减小可以使TVF具有更快的收敛速度。

3 仿真分析

3.1 TVF的计算量分析

Tsimbinos^[5]指出,阶数为 D 的Volterra滤波器的计算复杂度(乘法次数)可以用式(6)式来计算

$$C_{VF}(N, D) = \sum_{d=1}^D \frac{(N-1+d)!}{(d-1)!(N-1)!} \quad (6)$$

其中 N 为基级的长度, D 为阶数。

表1给出了普通VF和TVF两者计算量的比较结果,其中 C_{TVF} 为实验测量值。可以看出,取3阶Volterra滤波器时,TVF可以减小近三分之一的计算量。所取信号长度增加时,TVF在计算量减小方面的性能更加优越。

表1 普通VF和TVF计算量比较

	$D=1, N=7$	$D=1, N=9$	$D=3, N=7$	$D=3, N=9$
C_{VF}	7	9	315	594
C_{TVF}	7	9	230	289

3.2 TVF滤波性能仿真及误码率分析

仿真中,首先对TVF的滤波性能进行了分析。图5中给出了普通VF和TVF的滤波器性能曲线。可以看出,TVF在大幅减小计算量的同时,同样能保持很好的滤波特性。

本文采用BER作为评估新算法性能的标准。假设解扩后采样信号 $s(n)$ (如图1所示)的分布具有高斯分布特性,因此TVF的误码率可以由下式给出:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{E\{s(n)\}}{\sqrt{2 \operatorname{var}\{s(n)\}}} \right] \quad (7)$$

其中 $E\{s(n)\}$, $\operatorname{var}\{s(n)\}$ 分别表示均值和方差,它们的值可以采用Monte-Carlo仿真得到。

实际应用中,Volterra扩频接收机的输出误码率与接收机输入端的信噪比和信干比有关,下面的仿真分析中,假定输入端的信噪比为12dB。

为了研究所提算法的误码率性能,本文对不同信干比条件下,TVF扩频接收机的输出误码率进行了仿真,图6中给出了对应的误码率曲线。为了便于比较,图中同时给出了普通VF扩频接收机和没有经VF滤波的扩频接收机的误码率

曲线。从图中可以看出,TVF在大幅减小计算量的同时,还能够在BER性能方面略有提高。其原因在于TVF在屏蔽掉滤波器的部分节点的同时,也屏蔽掉了相应节点对应的干扰信号的自交调分量。

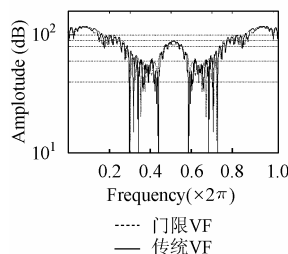


图5 传统VF和TVF滤波性能比较

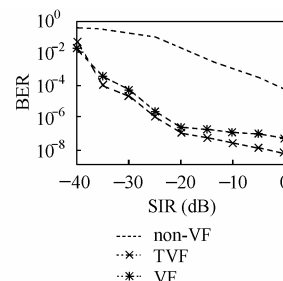


图6 不同信干比时的误码率比较

4 结束语

本文提出了一种优化Volterra滤波算法,即TVF,用于扩频通信中的窄带干扰抑制。这种新算法在大幅减小计算量的同时,同样能够保持良好的滤波性能。在此基础上建立起来的TVF扩频接收机具有更低的输出误码率。

参考文献

- [1] Tanner R, Cruickshank D G M. Volterra filter structure for DS-CDMA. Vehicular Technology Conference VTC'96, Atlanta, 1996: 1166 - 1170.
- [2] Bernardini R. A fast algorithm for general Volterra filtering. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(11): 1853 - 1864.
- [3] Miroslav M. A fast algorithm of nonlinear Volterra filter. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39(10): 2353 - 2356.
- [4] Panicker T M, Mathews V J. A fast Gauss-Newton parallel-cascade adaptive truncated Volterra filter. ICASSP-97, Munich, 21-24 April, 1997: 1873 - 1876.
- [5] Tsimbinos R. Computational complexity of Volterra based nonlinear compensators. Defence Sci. & Technol. Organ., Salisbury, SA, Australia. 25 April, 1996: 852 - 854.

马文强: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为卫星通信信号处理、卫星通信抗干扰技术。

陈豪: 男, 1944年生, 研究员, 博士生导师, 享受政府特殊津贴专家, 研究方向为飞行器总体与信息系统、卫星通信抗干扰技术等。