

基于递归最小二乘的 DS-SS 系统抗窄带干扰技术

徐向东^① 孟藏珍^{②③} 袁俊泉^①

^①(空军雷达学院信息与指挥自动化系 武汉 430019)

^②(空军雷达学院研究生管理大队 武汉 430019)

^③(中国人民解放军 94620 部队 福州 350002)

摘要: 该文针对 DS-SS 系统的未知窄带干扰,通过分析接收信号统计特性,提出递归最小二乘(RLS)滤波的干扰抑制算法。与盲递推最小二乘算法相比,减少了约束条件,降低了复杂度,而且克服了 LS 滤波算法不能实时处理的弱点,可以实现快速算法。仿真结果表明,该算法抑制干扰对 DS-SS 系统性能改善优于自适应线性滤波算法,而且不用考虑算法的收敛性,更利于工程应用。

关键词: 扩频; 递归最小二乘; 最小二乘; 窄带干扰

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2779-04

The Technique of Narrowband Interference Rejection for DS-SS Systems Based on RLS Algorithm

Xu Xiang-dong^① Meng Cang-zhen^{②③} Yuan Jun-quan^①

^①(Department of Information & Command Automation, AFRA, Wuhan 430019, China)

^②(Department of Graduate Management, AFRA, Wuhan 430019, China)

^③(94620 Unit of the PLA, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The algorithm of RLS to suppress unknown narrowband interference is proposed by analyzing the received signals's statistical character when the narrowband interference is unknown in DS-SS systems. Compared with Blind Recursive Least-Square, it doesn't need limiting condition and reduces the complication. What is more, it makes up the shortcoming that the algorithm of LS cannot process the real-time signal, and is implemented with fast algorithms. The simulation results show that the performance to suppress narrowband interference for DS-SS systems by the algorithm is better than the one of adaptive linear filter, and the convergence is not cared. It's easier to be applied.

Key words: Spread spectrum; Recursive Least-Square(RLS); Least Square(LS); Narrowband interference

1 引言

直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DS-SS)系统的抗干扰能力,决定于系统所采用的扩频序列的周期^[1-3]。囿于硬件实现技术的限制,通过增长扩频序列的长度获得无限的处理增益是不现实的。在实际应用中,DS-SS 系统很容易受到干扰,特别是在军事应用领域更会遭受恶意的强窄带干扰,仅依靠系统的干扰容限^[1-3]难以抑制干扰。有必要在信号解扩之前,采用信号处理的方法抑制干扰,提高系统的输入信噪比,达到增强系统抗干扰的能力。

窄带干扰抑制^[4-17]的信号处理方法主要有时域处理技术和变换域处理技术。时域处理技术主要是预测滤波算法,是利用宽带信号和窄带干扰在码片(Chip)速率采样后,样值间的相关性的差异,通过预测估计窄带干扰,然后与观测信号相减,而所得到的信号残差主要是宽带信号和信道噪声,从而实现干扰抑制的目的。统计特性已知的窄带干扰抑制方

法有 Kalman 滤波和非线性 ACM(Approximate Conditional Mean)滤波技术,而未知干扰主要是自适应滤波算法。变换域处理技术是利用数学变换,将信号变换到其他域,利用信号和干扰在该域的差别来实现干扰抑制的。根据信号的变换方式不同可分为快速傅里叶变换(FFT)、离散余弦变换(DCT)和重叠变换(LT)等^[11-14]。

文献[15,17]提出递归最小二乘算法(Recursive Least Square)用于 DS-SS 系统的窄带干扰抑制,收敛速度快,跟踪性能好,对相关矩阵特征值扩展不敏感,但是必须已知期望信号,这在实际中很难满足。文献[16]从信息的角度研究,把传输的信息比特作为目标信号,在扩频序列已知、目标信号未知的条件下,增加约束条件,导出了基于约束最小均值输出能量(MMOE)准则的盲递归最小二乘(BRLS)算法。从文献的分析看,算法跟踪性能好,但抑制干扰的效果不是很理想。文献[18]提出的最小二乘算法是数据块处理算法,不用考虑算法的收敛性,但是不能实时处理,在工程应用中受到限制。

本文从干扰信号的角度来研究,把窄带干扰信号作为目标信号。在接收信号解扩之前,对信号进行预处理抑制强窄带干扰。在分析接收信号统计特性的基础上,利用干扰信号与扩频信号及噪声的统计特性差异,在不增加约束条件及扩频序列未知的情况下,提出了递归最小二乘算法(RLS)算法。仿真结果表明,该算法收敛速度快,具有很好的干扰抑制效果,对系统的性能改善优于自适应线性滤波;同时克服了LS算法不能实时处理的缺陷,算法复杂度比文献[15,16]的盲递归最小二乘算法简单,而且在工程应用中,RLS算法容易实现快速算法^[19]。

2 信号特性分析

为便于讨论和理论分析,设在信号预处理的输入端信号为基带信号。DS-SS 系统的接收信号经 Chip 速率采样后,其离散化信号模型可表示为

$$z(k) = s(k) + i(k) + n(k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 $z(k)$ 是接收端信号(观测信号), $s(k)$ 是伪随机序列 PN, 是 $\{-1, 1\}$ 的独立分布序列, 且“-1”和“1”的分布概率相等; $i(k)$ 是窄带干扰(NBI), 带宽远小于 $s(k)$ 的带宽, $n(k)$ 是热噪声, 是零均值的高斯分布, 方差为 σ_n^2 , N 是采样点数。设各信号间互不相关。

由式(1)有

$$\begin{aligned} r_z(m) &= E[z(k-m)z^*(k)] \\ &= r_s(m) + r_i(m) + r_n(m), \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r_{z,i}(m) &= E[z(k-m)i^*(k)] \\ &= r_{s,i}(m) + r_i(m) + r_{n,i}(m) = r_i(m) \end{aligned} \quad (3)$$

因为 $s(k)$ 是宽带信号, 所以其相关长度短, 设 D 为整数延迟, 大小为宽带信号的自相关长度, 则用公式描述如下

$$r_s(m) = 0, \quad |m| \geq D \quad (4)$$

相反 $i(k)$ 是窄带信号, 其相关长度很长, 设 M 为其相关长度, 大小是预测窗口长度, 即 $r_i(l)$ 在 $0 \leq |l| \leq M$ 范围内有较大的数值, $M > D$; 用公式描述为

$$r_i(m) = 0, \quad |m| > M \quad (5)$$

而热噪声是高斯白噪声, 其 $r_n(m) = \delta(m)\sigma_n^2$, 所以将式(4), 式(5)代入式(2), 式(3)可得

$$r_z(m) = r_{z,i}(m), \quad m \neq 0, 1, 2, \dots, D-1 \quad (6)$$

所以, 由式(6)可以得出, 在一定条件下, 观测数据的互相关与观测数据与干扰的互相关相等。因此可以用观测数据来预测干扰, 而且可以用当前的观测数据作为前面观测数据预测估计的期望输出, 本文的方法正是基于此。

3 滤波算法

从上述可知, 伪随机序列 $s(k)$ 和白噪声 $n(k)$ 是宽带信号, 合适地选取 D , 使得在 Chip 速率采样后样值间的相关特性弱, 可近似认为不相关, 而窄带干扰 $i(k)$ 的样值间相关性很强, 可用前面的样值预测估计后面的样值。根据这个性

质, 就可以设计一个预测器对观测信号进行估计, 理想情况下, 预测结果基本代表了观测信号中的窄带干扰, 而观测信号与预测信号的残差就是伪随机序列 $s(k)$ 与白噪声 $n(k)$ 。从而实现了系统的干扰抑制。

3.1 最小二乘算法^[18]

因为 $z(k)$ 和 $i(k)$ 是线性相关的, 所以可以得到最佳线性估计有

$$\hat{i}(k) = \mathbf{c}^H \tilde{\mathbf{z}}(k-D) \quad (7)$$

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

其中 $\tilde{\mathbf{z}}(k-D) = [z(k-D-M+1), z(k-D-M+2), \dots,$

$$z(k-D-1), z(k-D)]^T$$

$$\mathbf{c} = [c(1), c(2), \dots, c(M)]^T$$

上式中 $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 表示矩阵的转置和共轭转置, \mathbf{c} 为干扰估计的系数 ($M \times 1$ 的列向量), k, M, D 的含义与上文相同。令 $\mathbf{z} = [z(1), z(2), \dots, z(k), \dots, z(N)]^T$, $\mathbf{e} = [e(0), e(1), \dots, e(k), \dots, e(N)]^T$, $\tilde{\mathbf{z}} = [\tilde{z}(1-D), \tilde{z}(2-D), \dots, \tilde{z}(N-D)]_{N \times M}^T$, $\mathbf{i} = [i(1), i(2), \dots, i(k), \dots, i(N)]^T$, 所以用矩阵表示有

$$\mathbf{e} = \mathbf{i} - \tilde{\mathbf{z}}\mathbf{c} \quad (9)$$

由文献[17]可得最小二乘解为

$$\mathbf{c} = \widehat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{d}} \quad (10)$$

其中 $\widehat{\mathbf{R}} = \tilde{\mathbf{z}}^H \tilde{\mathbf{z}}$, $\hat{\mathbf{d}} = \tilde{\mathbf{z}}^H \mathbf{z}$ 。

所以干扰抑制后, DS-SS 系统干扰对消器的信号输出为

$$e(k) = z(k) - (\widehat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{d}})^H \tilde{\mathbf{z}}(k-D) \quad (11)$$

3.2 自适应线性滤波算法^[7]

LMS(Least Mean Square)算法是最简单的自适应算法, 容易分析而且易于实现。设 LMS 滤波器的长度为 L , 则算法描述如下

$$\tilde{\mathbf{z}}(k-L) = [z(k-1), z(k-2), \dots, z(k-L)]^T \quad (12)$$

$$\hat{z}(k) = \tilde{\mathbf{z}}(k-L)^T \cdot \mathbf{c}(k-1) \quad (13)$$

$$\mathbf{c}(k) = \mathbf{c}(k-1) + \mu(k)(z(k) - \hat{z}(k)) \cdot \tilde{\mathbf{z}}(k-L) \quad (14)$$

式中 $\mathbf{c}(k)$ 是 LMS 滤波器的系数, k 与上文的含义相同。

其中 $\mu(k) = \mu(0)/r(0) + r(k)$, $r(k) = r(k-1) + \mu_0[\text{mean}(|\tilde{\mathbf{z}}(k-L)|^2) - r(k-1)]$ 。

在实际中, $\mu(0)$ 要尽量选择小点, 保证算法收敛; 而 $r(0)$ 要选择大些, 使得自适应步进不会过大, 而出现抖动, 保证算法的稳定性; 而 $\mu(0), r(0)$ 选择不当的话, 算法收敛速度变慢, 甚至发散。

3.3 盲递归最小二乘(BRLS)算法^[15,16]

文献[15,16]从传输信息的角度分析, 把信息比特作为目标信号。当目标信号未知时, 提出了 BRLS 算法。附加约束 $\mathbf{w}^T \mathbf{s} = b$ 的 MMOE 优化问题可描述为

$$\left. \begin{aligned} \min E\{\{\mathbf{w}^T \mathbf{r}(n)\}^2\} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^T \mathbf{s} = b, \quad b > 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其最优解为

$$\mathbf{w}_{\text{MMOE}} = \frac{b}{\mathbf{s}^T(\mathbf{R})^{-1}\mathbf{s}}(\mathbf{R})^{-1}\mathbf{s} \quad (16)$$

其中 \mathbf{s} 为扩频序列, 必须已知; \mathbf{R} 是观测数据的相关矩阵。从式(16)可以看出, 优化问题中目标函数不包括期望信号, 故称为盲算法。从文献[15,16]的分析可得, 该算法的跟踪性能较好, 但是抗干扰的效果不是很好。

3.4 递归最小二乘算法

把干扰信号作为目标信号, 通过分析接收信号的统计特性, 利用干扰信号与扩频信号的统计特性差异, 在接收信号解扩之前进行预处理, 可以放宽条件, 无需知道扩频序列, 采用一种新的 RLS 算法来抑制窄带干扰。与 3.3 节的算法相比, 减去了约束条件。算法导出如下, RLS 自适应滤波器从滤波器工作开始到当前时间, 滤波器的系数的更新总是令均方误差达到最小。所以可描述为

$$\min([i(k) - \mathbf{c}^T(k)\tilde{\mathbf{z}}(k-D)]^2) \quad (17)$$

其中 $\mathbf{c}(k) = [c_{k,1}, c_{k,2}, \dots, c_{k,L}]^T$, $\tilde{\mathbf{z}}(k-D) = [z(k-D-M+1), z(k-D-M+2), \dots, z(k-D-1), z(k-D)]^T$ 。 $\mathbf{c}(k)$ 表示 k 时刻 RLS 滤波器的系数, $\tilde{\mathbf{z}}(k-D)$ 是滤波器内的观测数据, k, M, D 的含义同上文, 当 $D=1$ 时为一阶前向预测。从式(17)中可看出, 期望值 $i(k)$ 是窄带干扰, 在实际中无法预知, 因此不能获得结果。但是由式(2)-式(6)的分析可以知, 将式(17)的 $i(k)$ 用 $z(k)$ 代替, 将不改变滤波器的系数, 从而有

$$\min([z(k) - \mathbf{c}^T(k)\tilde{\mathbf{z}}(k-D)]^2) \quad (18)$$

所以滤波器系数 $\mathbf{c}(k)$ 可由式(18)获得, 其最优解为^[19]

$$\mathbf{c}(k) = \mathbf{c}(k-1) + \mathbf{g}(k)e^*(k) \quad (19)$$

其中 $\mathbf{g}(k) = \mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{z}}(k-D)$

$$\mathbf{R}(k) = \mathbf{R}(k-1) + \tilde{\mathbf{z}}(k-D)\tilde{\mathbf{z}}^H(k-D)$$

$$e(k) = z(k) - \mathbf{c}^H(k-1)\tilde{\mathbf{z}}(k-D)$$

$\mathbf{g}(k)$ 为自适应增益矢量, $e(k)$ 为先验误差, 故上述算法又叫先验的自适应 LS 算法, $e(k)$ 输出是窄带干扰抵消后的信号, 主要由 PN 序列、信道噪声和干扰抵消剩余组成, 从而实现了抑制窄带干扰的目的。

4 仿真及结果分析

为检验基于递归最小二乘的 DS-SS 系统窄带干扰方法的正确性及其抑制干扰的性能, 本文在 MATLAB6.5 下进行如下仿真实验。设 s_k 是周期为 127 的 PN 码, 窄带干扰用 AR 过程来模拟, 仿真中采用极点为 0.99 二阶 AR 过程, 热噪声方差 $\sigma_n^2 = 0.01$, 信号采样点数取 $N = 2000$ 。PN 码信号的功率为信号功率, 热噪声功率为噪声功率, 则滤波器输入端信噪比的定义为

$$\text{SNR}_{\text{in}} = \frac{E[|\mathbf{s}|^2]}{E[|\mathbf{z} - \mathbf{s}|^2]} \quad (20)$$

输出端信噪比定义为

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{E[|\mathbf{s}|^2]}{E[|\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{s}|^2]} \quad (21)$$

而经滤波后系统的性能改善, 用系统信噪比的提高来定量分析。信噪比改善定义如下^[7]

$$\text{SNR}_{\text{improvement}} = \frac{E[|\mathbf{z} - \mathbf{s}|^2]}{E[|\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{s}|^2]} \quad (22)$$

上式中 $\mathbf{z} = [z(1), z(2), \dots, z(k), \dots, z(N)]$, $\mathbf{s} = [s(1), s(2), \dots, s(k), \dots, s(N)]$, $z(k), s(k)$ 的定义如式(1), $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(k), \dots, \varepsilon(N)]$, $\varepsilon(k)$ 为接收信号在干扰抑制后的剩余, 即 $s(k)$ 、 $n(k)$ 与干扰抵消剩余的和, k 的含义与式(1)中相同。

4.1 RLS 算法干扰抑制

用一阶前向预测 $D=1$, 窗口长度 $M=20$, 其干扰抑制过程图 1 所示。图 1 中, (a)是被窄带干扰(NBI)污染后的宽带传输信号, (b)是 RLS 算法滤波跟踪过程, 从图中可以看出, 在 RLS 算法在收敛后, 对干扰预测估计跟踪很好, (c)是 RLS 滤波器的系数收敛曲线, 在算法稳定后, 滤波系数基本稳定在某个值附近, (d)是干扰抵消后的宽带传输信号, 从图中可以看出干扰已经被大大降低, 滤波后的信号与原传输信号十分逼近, 再经解扩处理获得处理增益, 则干扰抵消剩余对 DS-SS 系统的影响很小, 可大大提高了系统的性能, 达到了干扰抑制的目的。

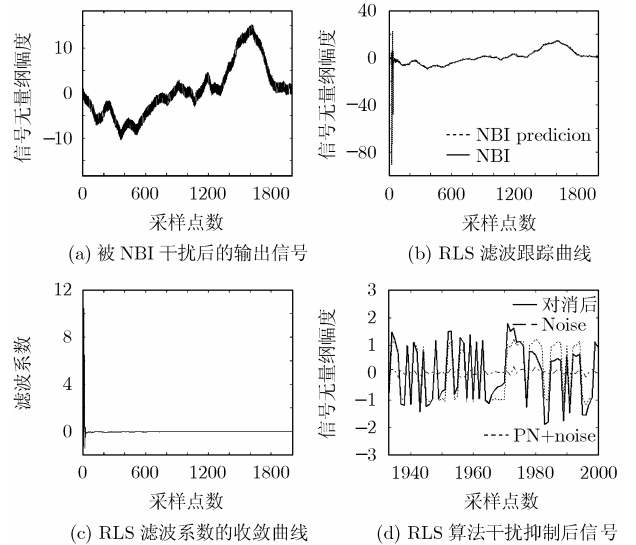


图 1 RLS 算法抑制窄带干扰过程

4.2 RLS 算法的滤波性能

图 2 是递归最小二乘算法的性能仿真曲线。图 2 中, 从 RLS 算法滤波估计的均方根误差曲线(a), 可看出, 算法收敛快, 在 50 次以内就已稳定, 与图 1 中结果相符; 在算法稳定后, 干扰的预测估计均方根误差很小, 算法具有良好滤波性能和跟踪性能。图 2 (b)是 RLS 算法与自适应线性滤波算法、LS 算法的性能比较曲线。两算法的预测窗口长度均取 30, Monto Carlo 次数取 100。从图中可以看出, 本文算法对 DS-SS 系统的改善性能要比自适应滤波算法好, 与 LS 算法的性能相近。但是它克服了 LS 算法不能实时处理的缺陷, 而

且容易实现快速算法^[20]。

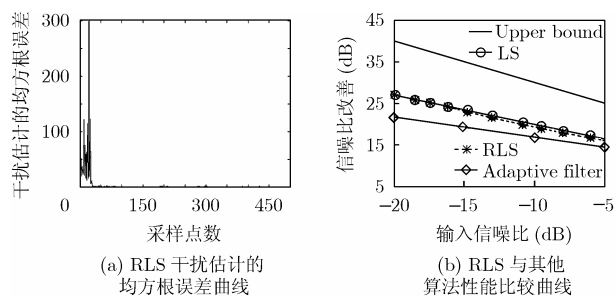


图 2 RLS 算法的性能曲线

5 结束语

本文针对 DS-SS 系统未知的强窄带干扰,在不增加约束条件和附加其它先验知识的条件下,在分析接收信号的统计特性的基础上,提出基于观测数据处理的递归最小二乘(RLS)算法,并进行了仿真。仿真结果表明,该算法对 DS-SS 系统窄带干扰具有很好的抑制效果,而且收敛速度快,跟踪性能好。与自适应线性滤波算法相比,对 NBI 的抑制后对系统的性能改善更好些,而且克服了 LS 算法不能实时处理的缺陷。

参考文献

- [1] 沈允春. 扩谱技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 236-269.
- [2] 查光明, 熊贤祚. 扩频通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 9-23.
- [3] 张欣. 扩频通信数字基带信号处理算法及 VLSI 实现[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 5-8.
- [4] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction theory[J]. *IEEE Trans. on AMSE.*, 1960, 82(1): 35-45.
- [5] Kalman R E and Busy R S. New results in linear filtering and prediction theory[J]. *IEEE Trans., on AMSE.*, 1961, 83(9): 95-108.
- [6] Vijayan R and Poor H V. Nonlinear techniques for interference suppression in spread-spectrum systems[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1990, 38(7): 1060-1065.
- [7] Rush L A and Poor H V. Narrowband interference suppression in CDMA spread spectrum communications[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, 42(2): 1969-1979.
- [8] Masreliez C J. Approximate non-Gaussian filtering with linear state and observation[J]. *IEEE Trans. on Auto.*, 1975, 20(2): 107-110.
- [9] Poor H V, and Rush L A. Narrowband interference suppression in spread spectrum CDMA[J]. *IEEE Pers and Personal Commun.*, 1994, (3): 14-27.
- [10] Poor H V. Active interference suppression in CDMA overlay systems[J]. *IEEE, J Select Areas Commun.*, 2001, 19(1): 4-20.
- [11] 李冲泥, 胡光锐. 多分辨重叠变换在扩谱通信系统抗干扰中的应用[J]. *电子学报*, 2000, 28(4): 17-19.
- [12] 朱丽平, 胡光锐, 单红梅. 扩频通信抗干扰中的局部离散余弦变换技术[J]. *数据采集与处理*, 2004, 19(2): 171-173.
- [13] 石光明, 李阜东, 焦李成, 刘芳. 窄带干扰抑制的子带门阻法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(2): 146-150.
- [14] 宋雪桦, 胡光锐, 唐斌. 重叠变换在扩频通信系统抗干扰中的应用[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(6): 842-844.
- [15] 李琳, 周文辉, 谭述森. 扩频系统中最小误码率意义下的最优干扰抑制技术[J]. *电子学报*, 2005, 33(1): 32-37.
- [16] 李琳, 周文辉, 谭述森, 张尔扬. 扩频系统中最优干扰抑制技术研究——盲自适应算法及并行实现[J]. *通信学报*, 2005, 26(4): 80-86.
- [17] 于素霞, 江修富, 张亚峰. 应用自适应算法抑制扩频通信中窄带干扰方法的研究[J]. *现代通信技术*, 2005, (3): 18-20, 48.
- [18] 孟藏珍, 徐向东等. 一种基于最小二乘的 DS-SS 系统抗窄带干扰方法[J]. *空军雷达学院学报*, 2006, 20(3): 174-176, 179.
- [19] Manolakis D G, Ingle V K, and Kogon S M 著. 周正, 等译. 统计与自适应信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 521-560.

徐向东: 男, 1965 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事雷达信号处理与检测、DSP 开发与运用等专业方向的研究。

孟藏珍: 男, 1978 年生, 硕士生, 助理工程师, 主要从事雷达信号检测与处理、扩谱技术应用等研究。

袁俊泉: 男, 1976 年生, 博士, 主要从事信号检测、参数估计及时频分析、DSP 及 FPGA 开发与运用研究。