

DSSS系统中自适应时变小波包干扰抑制

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】提出了一种基于自适应时变小波包变换实现直接序列扩频通信系统时变窄带干扰抑制的方法。该方法在自适应时域分解的基础上,利用小波包变换多分辨分析能力和良好的时频特性进行频率分解,将有用信号和干扰分离,然后将受扰频带置零后进行小波包合成,达到滤除时变窄带干扰的目的。计算机仿真结果表明,该方法与非时变自适应小波包抑制技术相比较,以计算复杂度为代价,能更灵活有效地跟踪和定位时变干扰,提供较好的误码率性能。

关键词 时域分解; 自适应小波包变换; 时变干扰; 扩频通信

中图分类号 TN973.3⁺2 文献标识码 A

Interference Excision Based on Adaptive Time-Varying Wavelet Packet Transform for DSSS Communication System

Yang Xiaomei, Li Deyu, Wang Tianfu, Zheng Changqiong

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

Abstract In this paper, an adaptive time-varying wavelet packet transform (WPT) excision algorithm is proposed for time-varying narrowband interference (TVNBI) in DSSS communication. Based on time decomposition, this method takes advantage of multi-resolution capability and favorable time-frequency character of WPT to perform frequency decomposition, separate desirable signal from jamming signal, the DS signal is recovered by wavelet reconstruction after setting zeros to polluted frequency sub-band. Computer simulation results show that compared with the non-time-varying WPT technique, this method could efficiently search and locate the TVNBI, provide satisfied bit error rate (BER) performance at the cost of increasing computation.

Key words time decomposition; adaptive wavelet packet transform; time-varying interference; spread spectrum

DSSS系统的处理增益受到带宽和复杂度的限制,其抗干扰能力是有限的。为了提高DSSS系统的窄带抗干扰能力,可在扩频的基础上配合干扰抑制技术。对于时变窄带干扰信号(Time-Varying NarrowBand interference, TVNBI),常采用非平稳信号的处理技术,如短时傅里叶变换、二次型时频分布,以及近年来备受关注的小波或小波包变换。

常见的小波包自适应干扰抑制方法^[1~4],利用有用信号(Desirable Signal, DS)和窄带干扰信号(NarrowBand Interference, NBI)的功率谱密度(Power Spectrum Density, PSD)的不同特点,再根据能量聚集度准则,通过小波包分解有效地定位NBI所在的频域范围并将其去除,最后通过小波包合成还原干扰抑制后的信号,进行解扩接收。本文在小波包频率分解的基础上,根据局部聚集度准则,在一个符号内首先进行

时间的分解,同时在每一分解/合成后的时间段上再执行小波包频率分解,从而更好地跟踪和定位TVNBI,达到抑制TVNBI的目的。

1 TVNBI的抑制算法

1.1 时域分解

考虑在某一时间段内(以一个符号为一时间单位段),接收的时变信号由ABCD四段构成,而A的统计特性明显与BCD不同。若将ABCD作为整体进行小波包分解,只是反映了整个时间段的频域分布,而没有体现出A与BCD之间的时间差别,这时应将信号分为A和BCD两段,再作小波包分解。时域分解时^[5],首先引入时域分辨率 T ,用 T 划分时间,在分解/合成后的各时间段上用小波包变换进行频域最优分解,定位并消除干扰频带。

引入局部聚集度准则^[6]

$$V = \frac{\sum_m \sum_k |FFT(m, k)|^4}{\left(\sum_m \sum_k |FFT(m, k)|^2 \right)^2} \quad (1)$$

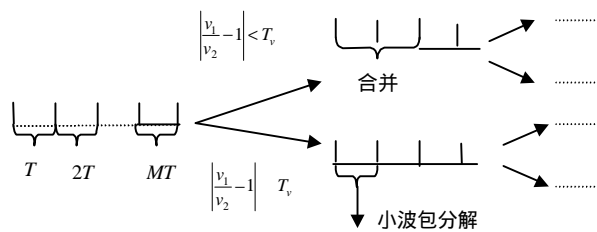


图1 时域的分解

设时间单位段长度为 L ,将其划分为 M 个子段 $[(k-1)T, kT](k \in 1, 2, \dots, M, MT = L)$,分辨率为 T 。时域分解的过程如图1所示。首先计算 $[0, T]$ 和 $[T, 2T]$ 两子段的局部聚集度 V_1 和 V_2 ,若两子段间聚集度的比例 $|(V_1/V_2) - 1|$ 大于预先设定的阈值 T_v ,表明 $[0, T]$ 和 $[T, 2T]$ 两段的时变特性不相似,则对 $[0, T]$ 作小波包分解,而 $[T, 2T]$ 留待作下一步的判断;否则,将 $[0, T]$ 和 $[T, 2T]$ 并为一时间段 $[0, 2T]$,再判断 $[T, 2T]$ 和 $[2T, 3T]$

段是否具有相似的时变特性。依次类推,若相似则继续合并两子段,否则将 $[0, 2T]$ 段或 $[T, 2T]$ 段数据进行小波包分解,最后获得长度为 L 的时间分解。

1.2 自适应小波包变换的干扰抑制

将时变接收信号进行时间的分解后,再在分解/合成后的各个时间段内执行自适应小波包(Adaptive Wavelet Packet Transform, AWPT)的频率分解。

1.2.1 小波包变换

在小波分解中,一个信号可以不断地分解为逼近信号(低频信号)和细节信号(高频信号),但细节信号不能再分解。而小波包分解算法可将细节信号(高频信号)进一步再分解,使信号在高频区得到更精细的结果,从而形成一种二叉树的分解。定义一对支撑长度为 L 的正交镜像滤波器^[1,2,4] $h(n)$ 和 $g(n)$,且 $g(n) = (-1)^n h(L-n-1)$,它满足

$$\begin{cases} \sum_n h(n-2k)h(n-2l) = \delta_{k,l} \\ \sum_n h(n) = \sqrt{2} \end{cases} \quad (2)$$

和两组对偶算子 H, G, H^* 和 G^*

$$\begin{cases} H(s_k)(i) = \sum_k s_k h(k-2i) \\ G(s_k)(i) = \sum_k s_k g(k-2i) \end{cases} \quad \begin{cases} H^*(s_i)(k) = \sum_i s_i h(k-2i) \\ G^*(s_i)(k) = \sum_i s_i g(k-2i) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $s_k \in l^2(N)$ 为输入信号序列。 $HH^* + G^*G = I$, $HG^* = GH^* = 0$ 。 H 和 G 相当于数字低通滤波器和高通滤波器。

小波包变换是通过函数序列以递归方式定义的,离散方式为

$$\begin{cases} a_{l+1}^{2n}(i) = \sum_{k \in Z} h(k-2i)a_l^n(k) \\ a_{l+1}^{2n+1}(i) = \sum_{k \in Z} g(k-2i)a_l^n(k) \end{cases} \quad (4)$$

而离散小波包的反变换过程为

$$a_l^n(i) = \sum_{k \in Z} h(i-2k)a_{l+1}^{2n}(k) + \sum_{k \in Z} g(i-2k)a_{l+1}^{2n+1}(k) \quad (5)$$

式中 l 和 n 为小波包的分解层数和该层的横向结点位置, a_l^n 表示第 l 层分解第 n 个结点的分解序列。

1.2.2 自适应小波包TVNBI的抑制

在DSSS系统中,窄带干扰方法的基本原理是PN码序列的PSD相对“平坦”,而窄带干扰的PSD却在某一局部频段显示出“尖峰”状,因而可利用信号的PSD特性以及小波包变换将有用信号和干扰信号分离。在小波包变换抑制过程中,需正确定位和迅速跟踪受扰频带,确保将干扰信号集中在尽量少的频带内,使滤除干扰的同时尽量减少对有用信号的损伤。引入能量聚集度准则

$$G = \mathbf{s}_p^2 / (\mathbf{s}_l \mathbf{s}_r) \quad (6)$$

式中 \mathbf{s}_p , \mathbf{s}_l 及 \mathbf{s}_r 分别为父结点、左结点和右结点信号分量的方差。 G 越大,表明输出信号的频谱越不平坦,窄带干扰信号集中在此频带上。依照此准则,在二叉树分解中,只考虑“受扰”频带的进一步分解,从而实现快速的跟踪,同时也使干扰集中在较少的频带内。

TVNBI抑制算法可分为时域分解、小波包分解、干扰滤除和小波包合成4个部分:

1) 时域分解:将一时间段数据 D_L (以一个符号为单位)分割为 M 块数据,时间分辨率为 $T(D_L = MD_T)$ 。计算各子段的局部聚集度 $V_m (m=1,2,\dots,M)$,从 D_1 数据块开始判断各子段间的局部聚集度是否相似。(1) 若 $\left| \frac{V_m}{V_{m+1}} - 1 \right| < T_V (m=1,2,\dots,M-1)$,则表明 D_m 和 D_{m+1} 数据块具有相似的统计特征,将两数据块合并;(2) 若 $\left| \frac{V_m}{V_{m+1}} - 1 \right| > T_V (m=1,2,\dots,M-1)$,表明 D_m 和 D_{m+1} 数据块不具有相似的统计特征,应分别加以处理,对 D_m 或之前已与 D_m 合并的数据块进行2)的自适应小波分解。依次类推,根据(1)和(2)继续判断 D_{m+2} 数据块是否与 D_{m+1} 具有相似的特征,直至完成 D_M 。

2) 自适应小波包分解:主要以能量聚集度 G 为依据对时域分解/合并后的数据块进行二叉树的前向分解,以获得最佳的二叉树形结构。(1) 设定最大的分解层数 M_{de} 和各层分解的阈值 $T_l (1 \leq M_{de})$; (2) 计算第 k 个结点的信号方差 \mathbf{s}_p , 将其小波分解成左右两子结点,并计算相应的信号方差 \mathbf{s}_l 和 \mathbf{s}_r , 获得能量聚集度 G ; (3) 如果 $G > T_l$, 表明窄带干扰存在,则需要进一步分解;否则终止该结点的分解过程;(4) 继续(2)、(3)的分解过程,直至达到 M_{de} 为止,从而形成了非规则的二叉树分解。

3) 窄带干扰的滤除:在2)中由于只对“受扰”的频带进行分解,因而干扰集中在二叉树的某些叶结点上,对干扰的处理只需针对叶结点。为准确定位干扰频带,引入方差比变量 $R = \mathbf{s}_l / \mathbf{s}_r$, 若 $R > 1$, 说明干扰集中在左结点,否则干扰集中在右结点,将其“受扰”频带的分解系数置为零,达到消除干扰的目的。

4) 进行小波包合成和解扩运算。

2 性能仿真

在仿真系统中,采用63位的 M 序列进行扩频,在每个码片上采样4个点,信号在AWGN信道中传输。在通信系统中,总是希望滤波器的冲激响应是对称的,以获得线性相位,因而文中采用MATLAB提供的近似对称的紧支撑双正交小波sym8进行仿真。假设信道中存在正弦型单音或多音干扰,信号与干扰的功率比(Signal Interference Rate, SIR)为-20 dB,以不同信噪比下的误码率来评价算法的性能。

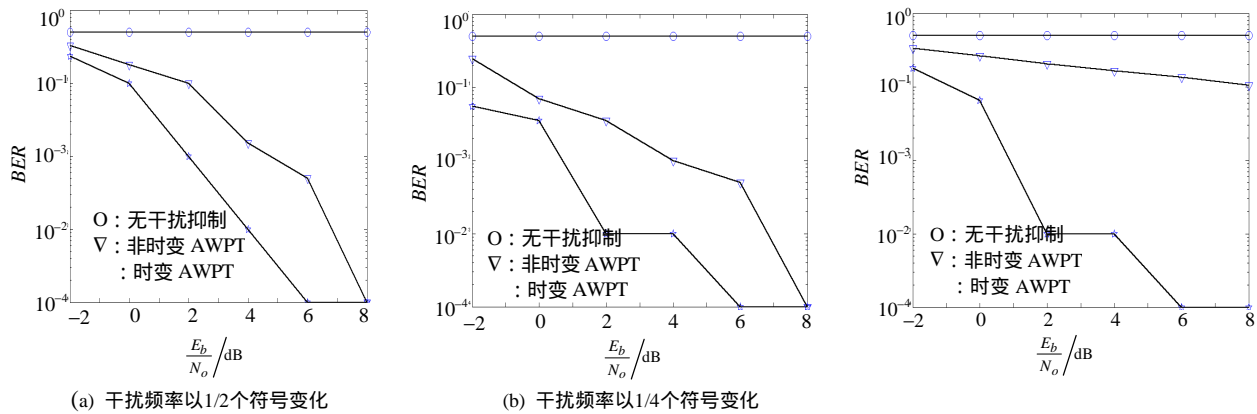
2.1 单音干扰

设单音干扰的频率分别以1/2和1/4个信息符号速率变化,与码片速率的归一化频率分别为[1/5, 2/5]和[1/5, 2/5, 3/5, 4/5],相位在[0, 2 π]间随机均匀分布。图2a、2b分别示出了两种情形下无任何窄带干扰抑制处理以及非时变AWPT(以单个符号为时间段)和时变AWPT抑制后的性能比较。结果表明,采用时变AWPT

抑制方法的系统性能得到较大的改善。

2.2 多音干扰

假设存在2个幅值相等的多音干扰($SIR = -20$ dB), 其中一个为平稳干扰, 频率与码片速率相同, 另一是以1/2符号变化的干扰, 归一化频率参数为 $[1/4, 1/2]$, 其误码率曲线如图3所示, 在此情形下, 时变AWPT抑制方法的系统性明显优于非时变的AWPT。



(a) 干扰频率以1/2个符号变化

(b) 干扰频率以1/4个符号变化

图2 单音干扰下的误码率曲线($SIR = -20$ dB)

图3 多音干扰下的误码率曲线($SIR = -20$ dB)

3 结论

本文利用小波变换的多分辨分析和良好的时频局部特性, 在自适应小波包分解算法的基础上, 提出了时变小波包分解抑制时变窄带干扰的算法, 在对频率进行分解的同时也兼顾实现时间的分解, 与非时变的小波包抑制算法相比较, 时变小波包抑制方法能更灵活有效地跟踪和定位时变干扰。尽管会带来大量的计算量(最多为非时变小波包抑制算法的 M 倍), 但在误码率性能上却优于非时变小波包抑制算法。

参考文献

- [1] Yang Weimin, Bi Guangguo. Adaptive wavelet packet transform-based narrowband interference canceller in DSSS systems[J]. Electronics Letters 3rd, 1997, 33(14): 1 189-1 190
- [2] Mehmet V T, Ali N A. Adaptive subband transform in time-frequency excisers for DSSS communication systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43(11): 2 776-2 782
- [3] 杨慰民, 毕光国. 基于自适应小波包变换的直接序列扩频通信窄带干扰抑制技术[J]. 通信学报, 1999, 20(7): 69-75
- [4] 孙松庚. 自适应小波包干扰抑制技术[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(3): 41-45
- [5] Cormac H, Martin V. Orthogonal time-varying filter banks and wavelet packets[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(10): 2 650-2 663
- [6] Xiong Zixiang, Kannan R, Cormac H, et al. Flexible tree-structured signal expansions using time-varying wavelet packets[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(2): 333-345
- [7] Ouyang Xuemei, Moeness G A. Short-time fourier transform receiver for non-stationary interference excision in direct sequence spread spectrum communication[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(4): 851-863
- [8] 郭经红, 程时昕. DSSS系统中自适应小波包干扰抵消器[J]. 通信学报, 2001, 22(7): 18-25

编辑 漆蓉