

# 一种基于近似理想重构余弦调制滤波器组的 DSSS 变换域干扰抑制方法

黎 剑 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:** 针对在变换域干扰抑制方法中子带滤波器组的阻带衰减性能不够理想而造成窄带干扰扩散的问题, 该文提出了一种使用近似理想重构余弦调制滤波器组的窄带干扰抑制方法。近似理想重构滤波器组在设计上具有更大的灵活性, 能够实现更高的阻带衰减。具有高阻带衰减特性的滤波器组能够更好地将窄带干扰信号变换到少数几个子带上, 从而利用门限检测的方法能更好地对窄带干扰加以抑制。仿真结果表明, 相对于传统的重叠变换滤波器组, 使用近似理想重构余弦调制滤波器组能够显著提高变换域接收机的抗窄带干扰能力。

**关键词:** 余弦调制滤波器组; 近似理想重构; 高阻带衰减; 变换域处理

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2128-04

## A Transform-Domain Interference Suppressing Method in Spread Spectrum Systems Based on Near Perfect Reconstruction Cosine-Modulated Filterbank

Li Jian Zhang Jia-shu

(Si-chuan Province Key Lab of Signal and Information Processing,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The filterbank without good stopband attenuation will cause the narrowband interference power diffusing in more subbands, and the interference suppressing in transform domain may become less effective and more difficult. Accordingly, a interference suppression method is proposed based on the Near Perfect Reconstruction (NPR) cosine-modulated filterbank, which has more freedom degree in design and is more likely to implement the high stopband attenuation. The filterbank with the characteristic of high stopband attenuation can transform the narrowband interference in less subbands, and therefore has more efficiency in suppressing the narrowband interference by the conventional threshold-detecting. Simulating results show that the performance of the transform-domain interference suppression method using the NPR filterbank is better than the one using the perfect reconstruction filterbanks such as the lapped transform filterbank.

**Key words:** Cosine-modulated filterbanks; Near Perfect Reconstruction(NPR); High stopband attenuation; Transform domain excision

### 1 引言

直接序列扩频(DSSS)通信系统由于其固有的扩频增益而具有一定的抗干扰能力。然而当系统受到的强窄带干扰超过干扰容限时, 性能会急剧下降, 因而必须采用干扰抑制方法来弥补系统抗干扰能力的不足。常用的窄带干扰抑制方法有时域预测、变换域技术和码辅助技术<sup>[1]</sup>。其中, 变换域技术由于收敛速度快、能有效抑制时变干扰等优点, 目前正被人们广泛地研究。

在变换域技术中, 一个重要的问题是选取一种合适的变

换, 使得窄带干扰被变换到最少的子带上, 从而在去除干扰时对有用信号造成的畸变也最小。然而由于变换本身的非理想性使得窄带干扰在变换过程中必然会通过旁瓣泄漏现象而泄漏一部分能量到邻近的子带上, 从而造成了部分分散的干扰难以被清除。目前, 重叠变换和滤波器组变换正被人们广泛地研究<sup>[1-4]</sup>。重叠变换在理论上属于一类具有理想重构特性的余弦调制滤波器组, 最早由Malvar<sup>[5]</sup>提出用于解决语音和图像中的子带编码问题, Medley<sup>[2]</sup>将其应用于扩频通信中的变换域干扰抑制方法, 证明它比传统的块变换(如DFT、DCT变换)更有效。其根本原因在于它的变换基向量<sup>[2]</sup>不受变换频带的约束而能实现更高的阻带衰减, 在一定程度上克服了旁瓣泄漏现象。尽管如此, 重叠变换的变换性能依然不够理想。

2006-02-20 收到, 2006-09-05 改回

国家自然科学基金(60572027)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-05-0794)和电子科技大学抗干扰国家级重点实验室基金项目(51434110104QT2201)资助课题

为了更好地克服旁瓣泄漏现象，需要设计具有高阻带衰减特性的变换滤波器组。理想重构滤波器组的设计本身是一个带理想重构条件约束的非线性优化过程，这个过程中存在的局部极值问题难以保证设计的滤波器组最终具有较高的阻带衰减。针对这些问题，本文提出了使用近似理想重构余弦调制滤波器组(NPRFB)来代替重叠变换滤波器组的变换域干扰抑制方法。通过放弃理想重构条件而利用Chebyshev窗函数<sup>[6]</sup>的高阻带衰减特性，基于窗函数法来优化设计余弦调制滤波器组的原型<sup>[2]</sup>滤波器，既避免了非线性优化过程又使得设计出的NPRFB具有很高的阻带衰减，从而更有效地克服了变换滤波器组的旁瓣泄漏现象。尽管NPRFB会引入一定的重构误差，但是相对于由于严重的旁瓣泄漏现象而造成的剩余窄带干扰的影响是微不足道的。文中介绍了这种NPRFB的优化设计方法和分析了由近似重构所产生的误差的影响。实验仿真表明，基于NPRFB的变换域干扰抑制方法能够显著提高系统的抗窄带干扰性能。

## 2 基于近似理想重构余弦调制滤波器组的变换域干扰抑制算法

Jones<sup>[7]</sup>最早提出了基于滤波器组的变换域干扰抑制方法的框架，如图1所示。其中分析滤波器组 $\{H_i, 0 \leq i \leq M-1\}$ 对接收到的扩频信号作变换；干扰抑制部分判定子带信号的幅度，通过限幅或置零的方式来抑制干扰；综合滤波器组 $\{G_i, 0 \leq i \leq M-1\}$ 则对干扰抑制处理后的变换域信号作反变换。在这个框架下，能够将传统的基于块变换和重叠变换的变换域干扰抑制系统解释为一个多速率滤波器组系统，从而能够更好地用滤波器组理论来分析旁瓣泄漏的影响。滤波器组的阻带衰减不够理想所产生的旁瓣泄漏现象会导致接收信号的变换结果存在两个缺点：

- (1)在窄带干扰所处的频点附近会有更多的子带通过旁瓣泄漏而携带干扰，且有相当部分子带由于得到的干扰能量较小，其幅度表现不明显，在实际中往往无法清除。
- (2)离窄带干扰频点较远处的子带，由于阻带的增益不够小也会携带少量的干扰，不仅难以清除而且各个子带累加起来也会对整个系统的性能造成影响。

因此，为了抑制窄带干扰在子带信号中的扩散，需要设计具有高阻带衰减特性的变换滤波器组。

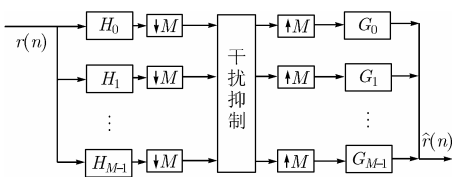


图1 基于余弦调制滤波器组的变换域干扰抑制算法结构

### 2.1 近似理想重构余弦调制滤波器组的设计

余弦调制滤波器组最大的特点是设计简便，而且对其结

构作多相分解<sup>[8]</sup>能得到基于DCT变换的快速算法<sup>[9]</sup>，从而降低在硬件实现时的计算复杂度。余弦调制滤波器组表示为：

$$h_k(n) = 2h(n) \cos\left((2k+1)\frac{\pi}{2M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) + (-1)^k \frac{\pi}{4}\right) \quad (1a)$$

$$g_k(n) = 2h(n) \cos\left((2k+1)\frac{\pi}{2M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) - (-1)^k \frac{\pi}{4}\right) \quad (1b)$$

其中  $0 \leq k \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1$ ,  $h_k$  和  $g_k$  分别为分析和综合滤波器的时域响应， $M$  为子带数目； $N$  为原型滤波器  $h(n)$  的长度，一般选择  $N$  为  $M$  的整数倍。余弦调制滤波器组的设计关键是对原型低通滤波器  $h(n)$  的设计。

假定  $H(e^{jw})$  为  $h(n)$  的频域表示，滤波器组能实现近似理想重构要求  $H(e^{jw})$  满足条件<sup>[10]</sup>：

$$|H(e^{jw})| \approx 0, \quad |w| > \pi/M \quad (2a)$$

$$\sum_{k=0}^{2M-1} |H(e^{j(w-k\pi/M)})|^2 \approx 1 \quad (2b)$$

为了满足式(2)中的条件，将待优化的目标函数表示为<sup>[8]</sup>：

$$\begin{aligned} \Phi = & \int_{w=0}^{\pi/M} \left| 1 - |H(e^{jw})|^2 - |H(e^{j(w-\pi/M)})|^2 \right|^2 dw \\ & + \alpha \int_{w=\pi/M}^{\pi} |H(e^{jw})|^2 dw \end{aligned} \quad (3)$$

$\alpha$  为权重因子。系统的失真传递函数表示为

$$T(e^{jw}) = \sum_{k=0}^{M-1} H_k(e^{jw}) G_k(e^{jw}) \quad (4)$$

设计的近似重构余弦调制滤波器组和重叠变换同属于余弦调制一类的滤波器组，结构分解形式相同，原型滤波器都具有线性相位特性，因而它们的运算量的计算方式是一致的。目前人们使用的调制重叠变换的长度  $N=2M$ ，扩展重叠变换的长度为  $N=4M$ ，考虑到滤波器的长度应在阻带衰减与计算复杂度之间有一个良好的折中，本文选取长度为  $4M$ ，其计算量与 ELT 相同。

为了设计余弦调制滤波器组，原型滤波器  $h(n)$  的设计基于Chebyshev窗函数<sup>[6]</sup>。令  $w_c$  表示  $h(n)$  的通带截止频率，通过对单变量  $w_c$  进行优化来获取目标函数  $\Phi$  关于  $w_c$  的极小值。图2是在  $M=64, N=4M$ ，权重因子  $\alpha=5$  时，基于对  $w_c$  在  $[0, 1/M]$  区间的优化结果。图2(a)是  $\Phi$  关于  $w_c$  的函数曲线。从结果可以看出，代价函数  $\Phi$  关于截止频率  $w_c$  具有全局极小值。图2(b)是系统的失真传递函数  $|T(e^{jw})|$ ，理想重构滤波器组对应的值为常数，本文设计的近似重构滤波器组带有一点波动，但它的波动幅度对扩频信号的判决影响很小。

图3是在  $M=64$  时，3种滤波器组的第32个子带滤波器的频率响应。MLT和ELT分别表示调制重叠变换和扩展

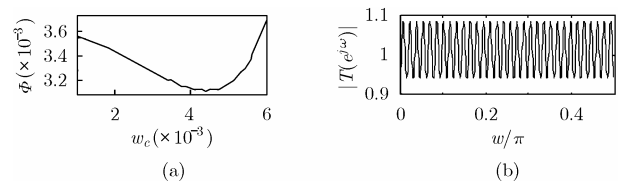


图2 余弦调制滤波器组的优化结果

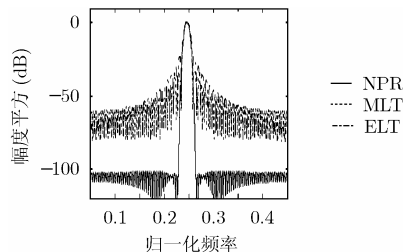


图3 MLT、ELT和NPR的第32个子带变换滤波器的频率响应重叠变换<sup>[2]</sup>, NPR为本文设计的近似重构余弦调制滤波器组。从图3中可以看出,NPR的频率响应的阻带衰减非常理想,高达100dB以上。当扩频信号被大功率窄带干扰“污染”时,利用NPR作变换能大大减小由于旁瓣泄漏现象而造成的窄带干扰在子带信号中扩散的影响。

## 2.2 变换域中的干扰处理算法

对于在变换域中的干扰处理算法有很多,如门限法、中值滤波和权值泄漏法等<sup>[1]</sup>。在实际中,最佳的处理算法应能针对窄带干扰的变化而自适应地调整某些参数。文献[11]提出了一种基于指数分布假设的算法,能够针对窄带干扰的变化而调整处理门限,该方法在不存在窄带干扰时,不会对有用信号产生任何畸变。

假设接收机的输入信号由扩频信号,加性白噪声和窄带干扰组成<sup>[12]</sup>,即

$$r(n) = s(n) + \eta(n) + j(n) \quad (5)$$

其中  $s(n)=d(n)c(n)$ ,  $d(n)$ 为经过 BPSK 调制的传输信号,  $c(n)$ 为 PN 码;为零均值的加性高斯白噪声,其双边功率谱密度为  $N_0/2$ ;  $j(n)$ 为窄带干扰。传输信号经 PN 码扩频后可近似看作白噪声,在接收机内经带通滤波后可近似被看作窄带高斯信号。由窄带高斯信号的性质可知,其包络服从瑞利分布,包络的平方服从指数分布。假定  $X$  为变换域的子带信号,由指数分布的数字特征可知:

$$\left. \begin{aligned} E(|X|^2) &= 1/\lambda \\ \text{Prob}\{|X|^2 < T\} &= 1 - \int_T^\infty \lambda e^{-\lambda x} dx = p \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

取门限  $T = 5/\lambda$ , 得到  $p=0.9933$ , 这个值能够保证 99.33% 的扩频信号在门限以下。窄带干扰抑制算法的具体步骤如下<sup>[11]</sup>:

(1)对子带信号的幅度平方求其均值  $1/\lambda$ , 以  $5/\lambda + T_0$  作为门限。 $T_0$ 是一个很小的正常数。

(2)幅度平方超过门限的子带信号置 0, 重复过程(1)。否则, 干扰抑制过程完毕。

上述过程在 2 次左右就可以完成对干扰的抑制。

## 3 仿真分析

衡量变换域干扰抑制方法的性能通常采用误码率 (BER)。在 BPSK 调制方式中, 误码率表示为<sup>[2]</sup>

$$P_e = \int_{\mu/\sigma}^{\infty} e^{-t^2} dt / (2\pi) \quad (7)$$

其中  $\mu$  和  $\sigma$  和分别为扩频信号的条件均值与方差。由于误码率主要由经干扰抑制后信号的信噪比决定, 而目前还没有有

效的方法对白噪声加以抑制, 因而误码率主要受窄带干扰抑制效果的影响。

### 3.1 近似理想重构特性对系统的性能影响分析

为了分析本文设计的近似理想重构滤波器组对变换域干扰抑制系统的影响, 对在无窄带干扰时, 使用近似理想重构与理想重构滤波器组产生的误码率曲线以及存在少量窄带干扰时的误码率曲线的仿真如图 4 所示。其中 SingTone 代表的是 JSR(干信比)=-10dB 时, 不经过任何干扰抑制处理的误码率曲线。在 JSR 为 -10dB 时, 干扰的幅度远小于

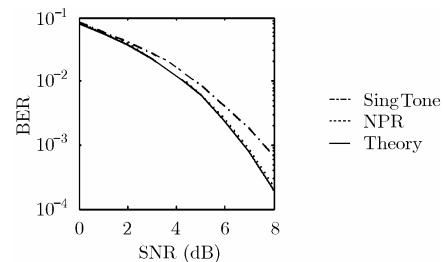


图4 在无窄带干扰的条件下, NPR 和理论曲线的偏差有用信号的幅度, 任何基于幅度检测的算法都无法抑制这个干扰。而在大功率窄带干扰的污染下, 由滤波器组的阻带衰减性能不足而造成的旁瓣泄漏现象会导致更多的子带携带有不明显的干扰而难以清除, 而提出具有高阻带衰减特性的近似理想重构滤波器组正是为了解决这个问题。从图 4 的结果可以看出, 近似理想重构特性对误码率的影响远小于由旁瓣泄漏而造成的剩余窄带干扰的影响。

### 3.2 基于近似理想重构滤波器组的变换域窄带干扰抑制方法的性能分析

在仿真分析中, 窄带干扰的模型通常采用 Medley<sup>[2]</sup>使用的单音干扰和高斯窄带干扰。单音干扰的模型表达式为

$$j(n) = A_j \cos(\delta \omega n + \theta) \quad (8)$$

其中  $A_j$  表示干扰幅度,  $\delta \omega$  为干扰频率与载波频率的偏差,  $\theta$  是  $[0, 2\pi)$  范围内均匀分布的随机相位。对于高斯窄带干扰, 根据文献[13]的分析, 选用多个正弦波的叠加与使用白噪声激励带通滤波器来模拟窄带干扰几乎具有相同的性能。因此, 仿真中窄带干扰的模型采用多个单音干扰的叠加来模拟。

在仿真中, 单音干扰的中心频点为  $\delta \omega = 0.126984 \text{ rad/s}$ ; 窄带干扰的中心频点与单音干扰一致, 窄带干扰覆盖范围为整个频带的 10%。PN 序列长度为 64, JSR 为 25dB, 信噪比定义为  $E_b/N_0$ 。图 5(a)和图 5(b)分别为单音干扰和窄带高斯干扰模型下的误码率曲线。

图 5 的结果表明, 干扰模型无论是单音干扰还是高斯窄带干扰, 使用 NPR 都能表现出更优的性能。图 6 是重叠变换与近似理想重构滤波器组在信噪比为 5dB 时, 误码率随干扰功率的变化曲线。从图 6 的实验结果可以得出, NPR 能显著提高接收机的抗大功率窄带干扰的能力。重叠变换只能工作在干信比 30dB 以下, 而 NPR 在干信比(JSR)达到 80dB 时仍然能够正常工作。

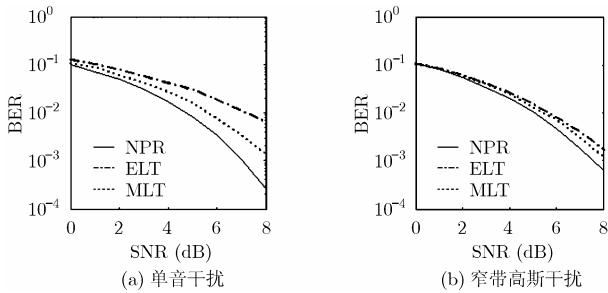


图5 误码率与信噪比的关系

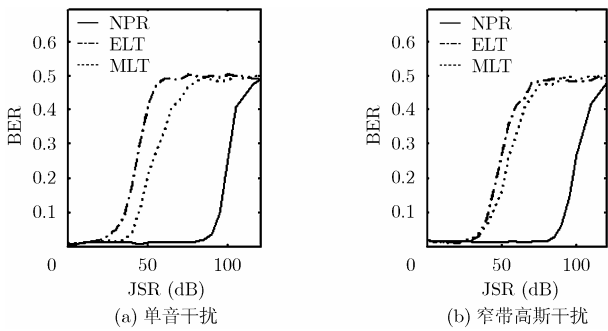


图6 信噪比为 5dB，误码率与窄带干扰功率的关系

图 7(a)比较了 3 种滤波器组在中心频点为  $\delta\omega = 0.25$  rad/s 的高斯窄带干扰下, SNR=5dB, JSR=10dB, 误码率随窄带干扰所占频带的百分比大小之间的关系。图 7(b)是在单音干扰下, 误码率与干扰频点的位置之间的关系。可见, 使用本文设计的近似理想重构余弦调制滤波器组的变换域方法的误码率性能对干扰频点的位置与重叠变换一样不敏感, 而这种不敏感性也是变换域接收机应具有的一个优点。当窄带干扰所占带宽增大时, 基于滤波器组的变换域方法的性能都将下降。实际上, 当窄带干扰所占带宽在 10% 以下时, 基于滤波器组的变换域方法才能有效工作。

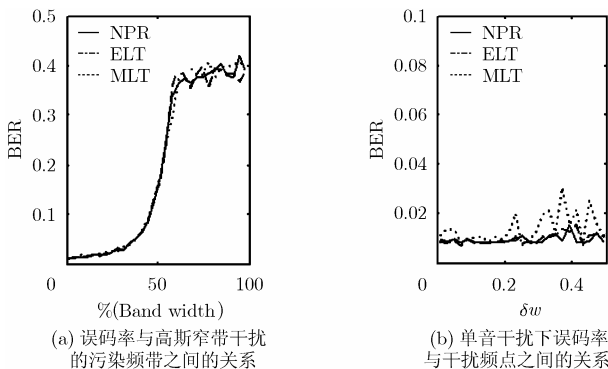


图7

通过上面的实验结果, 说明造成变换域干扰抑制性能下降的主要原因是由于旁瓣泄漏而引起窄带干扰抑制不完全所造成的。使用近似理想重构余弦调制滤波器组能够显著地抑制子带滤波器组的旁瓣泄漏现象, 从而能比较明显地提高变换域干扰抑制方法的性能。

#### 4 结束语

本文提出在变换域干扰抑制算法中使用近似理想重构余弦调制滤波器组来解决子带滤波器组的旁瓣泄漏现象, 能够有效地抑制窄带干扰在子带信号中的扩散。在近似理想重

构余弦调制滤波器组的设计上利用了 Chebyshev 窗函数具有的高阻带衰减特性, 使得设计出的滤波器组更有利于将窄带干扰变换到少数子带上。仿真结果表明, 在变换域方法中使用具有高阻带衰减特性的近似理想重构滤波器组来代替理想重构滤波器组, 不仅能提高系统的误码率性能, 并且能显著增强变换域干扰抑制接收机在大功率窄带干扰下的生存能力。

#### 参考文献

- [1] 李琳. 扩频通信系统中的自适应窄带干扰抑制技术研究. [博士学位论文], 长沙国防科技大学, 2004.
- [2] Medley M J, Saulnier G J, and Das P K. Narrow-band interference excision in spread spectrum systems using lapped transforms[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1997, 45(11): 1444-1455
- [3] Tobias H S and Markku R. Filter-bank-based narrowband interference detection and suppression in spread spectrum systems[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, 2004(8): 1163-1176.
- [4] 朱丽平, 胡光锐, 朱义胜. 一种新的重叠双正交变换域窄带干扰抑制技术[J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(12): 1986-1988.
- [5] Malvar H S. Extended lapped transforms: Properties, applications, and fast algorithms[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 40(11): 2703-2714.
- [6] Khan A A. *Digital Signal Processing Fundamentals*[M]. US: DaVinci Engineering Press, 2004: 350-351.
- [7] Jones W W and Jones K R. Narrowband interference suppression using filter-bank analysis/ synthesis techniques [C]. *IEEE MILCOM'92, San Diego*, 1992: 898-902.
- [8] Vaidyanathan P P. *Multirate Systems and Filter Banks*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993: 100-373.
- [9] Koilpillai R D and Vaidyanathan P P. Cosine modulated FIR filter bank satisfying perfect reconstruction[J]. *IEEE Trans. On Signal Processing*, 1992, 40(4): 770-783.
- [10] Lin Yuan-pei and Vaidyanathan P P. A Kaiser window approach for the design of prototype filters of cosine modulated filterbanks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, 5(6): 132-134.
- [11] 张春海, 薛丽君, 张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(3): 461-465.
- [12] Milstein L B. Interference rejection techniques in spread spectrum communications[J]. *Proc. IEEE*, 1988, 76(6): 657-671.
- [13] Ketchum J W and Proakis J G. Adaptive algorithms for: Estimating and suppressing narrowband interference in PN spread-spectrum systems[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1982, 30(5): 913-924.

黎 剑: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为通信系统中的窄带干扰抑制以及多分辨率滤波器组设计。  
 张家树: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 信号与信息处理四川省重点实验室主任, 主要研究方向为信号与信息处理、混沌信息工程学、信息安全等。