

## 直扩通信中窄带干扰抑制的边带相关置换算法

张晓林 郭黎利

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 论文提出了一种新的窄带干扰抑制算法, 基于信号边带相关性的边带相关置换算法, 通过计算接收信号频谱的边带相关函数确定载频和干扰中心频率, 然后利用直扩信号频谱的对称性, 用相对于窄带干扰的边带对称值代替干扰值达到消除干扰的目的。该算法对频谱具有对称性的调制方式都适用。计算机仿真结果表明边带相关置换算法的性能要优于变换域干扰置零的常规算法。

**关键词:** 窄带干扰; 抑制; 边带相关置换; 直扩通信

**中图分类号:** TN914.42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)01-0086-03

## Narrow-band Interference Suppression in DSSS by Side Correlation Replacement Algorithm

Zhang Xiao-lin Guo Li-li

(School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In direct sequence spread spectrum narrow-band interference suppression is one of the difficult tasks in signal processing. This paper proposes a new narrow-band interference suppression algorithm called side correlation replacement algorithm based on side band correlation of signal. The signal carrier and center frequency of narrow interference are fixed on by calculating the side correlation function. Then narrow-band interference is eliminated when it is replaced by side correlation value. This algorithm is good for all modulation whose spectrum is symmetry. Computer simulation results demonstrate that the algorithm is more effective than transform domain interference returns zero.

**Key words:** NBI; Suppression; Side correlation replacement (SCR); DS communication

### 1 引言

直接序列扩频通信(简称直扩通信)是一种抗干扰能力很强的通信技术, 在军事通信、移动通信中获得了广泛应用。从理论上讲, 由于具有较高的扩频增益, 直扩通信对多种类型的干扰都具有较好的抑制性能。但在实际应用中, 常由于受到带宽的限制, 扩频增益不足以抑制大功率的窄带干扰。因此针对直扩系统的窄带干扰抑制技术是近十年来扩频通信领域的一个重要研究热点。窄带干扰抵消可以在时域或变换域上完成。时域抵消<sup>[1,2]</sup>技术实现简单, 通过自适应算法产生最优权值, 可有效抑制平稳窄带干扰, 但多数算法需要长时间的迭代才能达到稳定, 无法跟踪上快变的干扰。基于变换域<sup>[3,4]</sup>的干扰抵消包括频域抵消、重叠变换域抵消及子带变换等多种算法。传统的变换域方法在确定窄带干扰所处的频段后, 在频域内, 用切除器(或切除函数)消除干扰, 接收信号经FFT或滤波器组分解, 在频域内乘以切除函数, 再反变换恢复接收信号。但是在消除干扰时, 如果切除函数所占的频带较宽或者有用信号在干扰带宽中的能量较大, 则将导致宽带直扩信号出现严重的失真, 使得通信误码率升高。

本文提出的窄带干扰抑制技术, 首先通过求边带相关函数, 准确定位直扩信号载频和窄带干扰中心坐标, 然后利用直扩信号频谱的边带对称性, 采用边带相关置换算法, 用频谱边带对称值代替窄带干扰值, 从而消除干扰, 降低通信误码率。仿真结果表明, 与采用切除函数的变换域DFT算法相比, 边带相关置换算法性能更优越。

### 2 DSSS 系统模型

设到达接收机的合成信号为  $r(t)$ , 可以表示为

$$r(t) = s(t) + j(t) \quad (1)$$

其中  $s(t)$  是直扩信号,  $j(t)$  是窄带干扰。直扩信号  $s(t)$  采用 BPSK 调制, 可以表示为

$$s(t) = a(t)c(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2)$$

其中  $a(t)$  是信息序列,  $c(t)$  是伪随机序列,  $\omega_0$  为直扩信号的载波频率,  $\varphi_0$  为载波初相。直扩信号  $s(t)$  的功率谱密度函数为

$$S_s(\omega) = \frac{1}{4\pi N^2} S_a(\omega_0 - \omega) + \frac{N+1}{4\pi N^2} \cdot \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \text{sinc}^2\left(\frac{\pi k}{N}\right) S_a\left(\omega_0 - \omega + \frac{2k\pi}{NT_c}\right) \quad (3)$$

其中  $S_a(\omega) = T_b \text{sinc}^2(\omega T_b / 2)$  是传输的信息序列  $a(t)$  的功率

2006-06-12 收到, 2006-11-20 改回

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20050217006)和国家无线电监测中心立项项目(05-MC-KY-30)资助课题

谱密度函数， $T_b$  是  $a(t)$  的传输速率， $N$  是伪随机序列  $c(t)$  的周期， $T_c$  是  $c(t)$  的码片时宽， $\text{sinc}(\cdot)$  是抽样信号，表达式为  $\text{sinc}(x) = \sin x / x$ 。由式(3)可以看出，右边第1项是载波频率分量，大小与伪随机序列周期  $N$  的平方成反比，通常  $N$  都比较大，因此载波频率分量很小，直接检测几乎不可能。

### 3 边带相关置换算法

#### 3.1 变换域干扰置零

在窄带干扰抑制的算法中，DFT是常用的数字信号处理工具。在实现过程中，对输入的信号每  $N$  点作FFT变换，就得到了信号的频域值，因为窄带干扰信号会在频谱中凸显出来，只要在频域将其置为零即可以实现干扰消除，经干扰消除后的信号经IFFT后再送到解扩器和解调器，这样就实现了基于DFT的干扰消除。但如果消除函数所占的频带较宽或者有用信号在干扰带宽中的能量较大，则将导致宽带直扩信号出现严重的失真，使得通信误码率升高。

#### 3.2 边带相关置换算法

本文提出的边带相关置换算法的特点在于对窄带干扰不是简单的置零，而是充分利用了直扩信号频谱的对称性，用频谱相对于窄带干扰的对称值代替干扰值，原理如图1所示。从式(3)可以看出，直扩信号功率谱的包络是  $\text{sinc}^2(x)$  函数，该函数是以  $x = 0$  为中心左右对称的。对直扩信号而言，就是其功率谱的左右两个边带以载频  $\omega_0$  为中心对称相等：

$$S_s(2\omega_0 - \omega) = \frac{1}{4\pi N^2} S_a(\omega_0 + \omega) + \frac{N+1}{4\pi N^2} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2\left(\frac{\pi k}{N}\right) \cdot S_a\left(\omega_0 + \omega - \frac{2k\pi}{NT_c}\right) = S_s(\omega) \quad (4)$$

如果窄带干扰频率为  $\omega_j$ ，载频为  $\omega_0$ ，令

$$S_s(\omega_j) = S_s(2\omega_0 - \omega_j) \quad (5)$$

干扰频率  $\omega_j$  的幅度值就被直扩信号在  $2\omega_0 - \omega_j$  点的功率谱  $S_s(2\omega_0 - \omega_j)$  代替。如果确定了窄带干扰的中心频率以后，按照式(5)在一定带宽内逐点置换，那么窄带干扰将会被抑制掉。

#### 3.3 边带相关算法的载频和干扰估计

从3.2节可以看出，边带相关置换算法的实现前提是准确估计载频和窄带干扰中心频率。通过FFT变换可以得到多个极大值，但是在信号形式未知时，并不能确定哪一个是信号，哪一个是干扰。而信号的载波频率有时是检测不到的，通过对式(3)的分析可知，采用BPSK调制的直扩信号的载频分量非常小，与  $N^2$  成反比，FFT变换是检测不到载频的。本文利用直扩信号频谱的边带相关性，采用文献[5]边带相关方法计算载频。方法是逐点计算直扩信号功率谱各点的对称相关值，最大值将出现在对称点上，即载波频率处。因此只要检测边带相关后的最大值，就可以确定载波频率。边带相关算法可以表述为

$$F(f)_{\Delta f} = \frac{1}{MN^2} \sum_{x=1}^M S\left(f + \frac{x}{NT_s}\right) S\left(f - \frac{x}{NT_s}\right) \quad (6)$$

其中  $S(f) = \sum_{n=0}^{N-1} r(nT_s) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ ，是待检测信号  $r(t)$  的频谱。

$r(nT_s)$  是  $r(t)$  的时域采样值，采样周期为  $T_s$ ， $N$  代表时域样本数， $M$  代表时域窗口宽度。 $\Delta f = 2M/(NT_s)$ ，是频域滑动窗口宽度， $\Delta f$  的选取要影响到边带相关极大值，通过仿真得到的  $\Delta f$  与边带相关极大值的关系曲线如图 2 所示。由图 2 可见如果  $\Delta f$  减小，边带相关极大值也将减小，不利于极大值的检测，如果  $\Delta f$  取的过大，运算量将随之增加。本文中的  $\Delta f = 200\text{Hz}$ 。

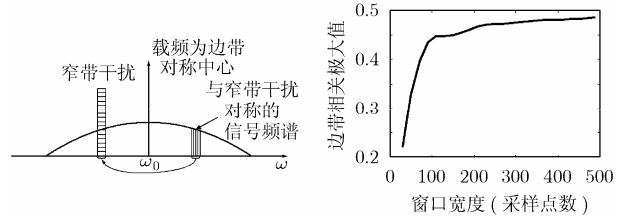


图 1 边带相关置换算法示意图

图 2 频域滑动窗口宽度与边带相关极大值的关系曲线

综合以上分析，边带相关置换算法的实现过程如图 3 所示。

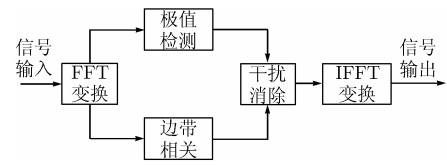


图 3 边带相关置换算法实现

#### 3.4 算法评价指标

仿真中采用信干比增进因子作为窄带干扰抑制效果的评价指标<sup>[6]</sup>。信干比增进因子定义为输出信干比与输入信干比的比值：

$$\eta = \text{SNR}_o / (\text{SNR}_i) \quad (7)$$

其中  $\text{SNR}_o$  是窄带干扰抑制后的输出信干比； $\text{SNR}_i$  是窄带干扰抑制前的输入信干比。

### 4 仿真分析

由图 3 确定边带相关置换算法的仿真步骤如下：

- (1)对接收信号  $r(t)$  做 FFT 变换，得到  $r(t)$  的频谱  $R(f)$ ，搜索  $n$  个较大值点并确定对应的频率坐标；
- (2)求  $R(f)$  的边带相关函数，通过最大值的搜索确定载波频率，结合步骤(1)确定干扰中心频率；
- (3)由边带相关置换算法，根据式(5)消除窄带干扰。为了确定干扰消除的频率范围，定义边带相关置换因子  $\beta$ ， $\beta$  等于以窄带干扰最大值对应频率为中心的频率窗口宽度。
- (4)求干扰消除后的频谱  $R'(f)$ 。
- (5)计算信干比增进因子  $\eta$ ，评价算法效果。

在下面的原理性仿真时直扩信号的调制方式为 BPSK，

载频为  $f_0 = 2000\text{Hz}$ ，伪随机码速率为  $R_c = 200\text{bit/s}$ 。信道中的窄带干扰分两种情况，一种是信道存在3个单频干扰，分别为  $j_1(t) = \sin(2\pi \times 600t)$ ， $j_2(t) = \sin(2\pi \times 1500t)$ ， $j_3(t) = \sin(2\pi \times 2100t)$ 。仿真结果如图4。图4(a)为包含3个单频干扰的合成信号  $r(t)$  的频谱图；图4(b)为  $R(f)$  的边带相关值，最大值对应坐标为  $2000\text{Hz}$ ，正是载频  $f_0$ 。而单频干扰的边带相关性很弱，因此其边带相关值相对于直扩信号频谱的边带相关最大值而言非常小，在图4(b)中几乎看不见。图4(c)是采用边带相关置换法消除了单频干扰的频谱图，直观看抑制效果很好。

另一种情况是信道中存在一个大功率的窄带干扰，调制方式为 MSK，干扰的中心频率为  $f_j = 1900\text{Hz}$ ，带宽为  $10\text{Hz}$ ，仿真结果如图5所示。图5(a)是包含窄带干扰的合成信号  $r(t)$  频谱，由图可见窄带干扰处于直扩信号的第一零点带宽内，因此是有效干扰。图5(b)是  $R(f)$  的边带相关函数，最大值对应的坐标为  $2000\text{Hz}$ ，正是直扩信号载频。结合图5(a)可以确定窄带干扰的中心频率为  $1900\text{Hz}$ 。图5(c)是采用边带相关置换算法消除窄带干扰后的信号频谱图。为了评价算法对窄带干扰的抑制效果，对输入输出信干比作了计算。由于消除干扰时，信号并没有被简单的消除掉，而是用对称点代替，因此可以忽略干扰抑制器对信号的衰减。具体做法是假设信号在干扰抑制前后功率不变，那么干扰抑制后的总功率减去信号功率就是干扰功率。结果如图6所示。横坐标为输入信干比，纵坐标为输出信干比，可见窄带干扰抑制效果明显。为了进一步分析边带相关置换算法的有效性，本文对变换域干扰置零方法也作了仿真，两种算法的对比结果如表1所示。在边带相关置换因子  $\beta$  分别取  $180\text{Hz}$ ， $100\text{Hz}$ ， $40\text{Hz}$  时，两种算法在相同的输入信干比条件下，信干比增进因子  $\eta$  差别较大，由此可以认为边带相关法更有效。

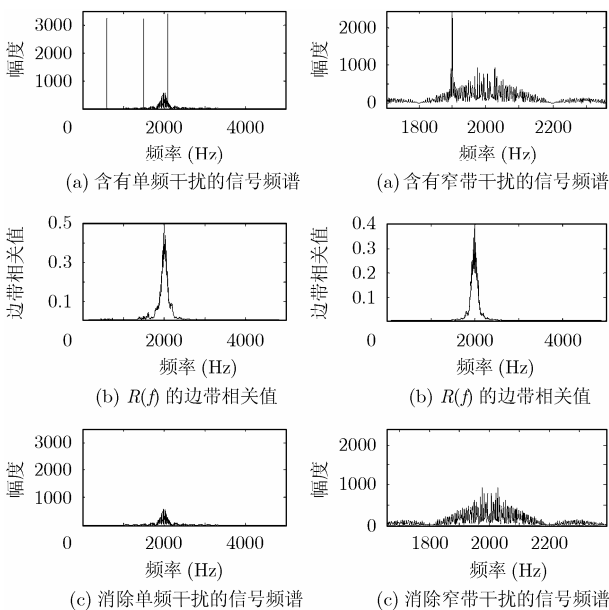


图4 单频干扰抑制效果

图5 窄带干扰抑制效果

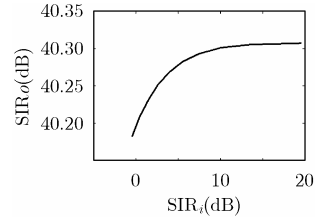


图6 窄带干扰抑制的信干比增进因子

表1 两种算法的信干比置换因子(dB)

	$\beta = 180\text{Hz}$			$\beta = 100\text{Hz}$			$\beta = 40\text{Hz}$		
SIR	-0.44	5.57	19.55	-0.44	5.57	19.55	-0.44	5.57	19.55
$\eta_{\text{DFT}}$	3.99	-2.31	-16.15	6.98	0.99	-12.91	11.24	5.23	-8.71
$\eta_{\text{SCR}}$	41.32	35.71	23.87	39.76	34.60	21.92	36.21	33.93	20.11

5 结束语

本文提出了一种新的窄带干扰抑制算法——边带相关置换算法，该算法充分利用直扩信号频谱的边带相关特性，一方面通过计算边带相关函数估计载波频率和干扰中心频率，另一方面通过边带相关置换抑制窄带干扰。该算法的优点是计算量小，实时性好，对信号的损失小。不但对采用 BPSK 调制的直扩信号有效，对所有频谱具有对称性的调制方式都有效。通过比较分析证明，边带相关置换算法的性能要优于变换域干扰置零方法。当背景中的高斯噪声比较弱时，相对于其他窄带干扰抑制算法，边带相关置换算法同样具有以上优点。该算法的不足之处是当多个窄带干扰中恰好有两个关于载波频率对称的干扰时，抑制效果会变差。

参考文献

- [1] Milstein L B. Interference rejection techniques in spread spectrum communication[J]. *Proc IEEE*, 1988, 76(6): 657-671.
- [2] Li Lob-Ming and Milstein L B. Rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum system using transversal filters[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1982, 30(5): 925-928.
- [3] Yong J A and Lehnert J S. Analysis of DFT-based frequency excision algorithms for direct-sequence spread-spectrum communications[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1998, 46(8): 1076-1087.
- [4] Chael J M, Saulnier M G J, and Das P K. Narrow band interference excision in spread spectrum systems using apped transforms[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1997, 45(11): 1444-1455.
- [5] Hill P C J. Techniques for detecting and charactering covert communication signals. European Conference on Security and Detection, MILCOM, 1997: 57-60.
- [6] 许光辉, 赵海波, 崔小准. 码分多址系统中基于判决引导的窄带干扰抑制非线性算法[J]. *上海交通大学学报*. 2005, 9(39): 1544-1547.

张晓林: 男, 1971年生, 副教授, 研究方向为宽带数字通信、信号检测与识别。

郭黎利: 男, 1955年生, 教授, 研究方向为宽带数字通信。