

文章编号 :1001 - 2486(2005)01 - 0073 - 05

基于指数分布假设的直接序列扩频系统抗窄带干扰技术研究*

张春海,高凯,张尔扬

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :在扩频信号加信道噪声近似服从高斯分布条件下,利用均匀 DFT 滤波器组性质,得到变换域谱线幅度平方服从指数分布的结论。通过假设检验方法,可对直接序列扩频系统接收信号中的窄带干扰进行检测和抑制。理论分析和数值仿真结果表明,算法能有效抑制常见的单音、多音干扰以及窄带高斯干扰。

关键词 :直接序列扩频;抗干扰;指数分布

中图分类号 :TN914.42 文献标识码 :A

Exponential Distribution-based Research on Narrowband Interference Suppression in DSSS Communication Systems

ZHANG Chun-hai,GAO Kai,ZHANG Er-yang

(College of Electronic Science and Engineering,National Univ. of Defense Technology,Changsha 410073,China)

Abstract :Under the condition that only the direct sequence spread spectrum signal and additive Gaussian noise are present at the receiver, the square of amplitude of received signal after DFT is assumed to be exponentially distributed. Based on this assumption, a novel narrowband interference detection and suppression algorithm is proposed. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that the algorithm can suppress multi-tone jamming and narrowband Gaussian jamming efficiently.

Key words :direct sequence spread system;interference suppression;exponential distribution

直接序列扩频(DSSS)系统有良好的保密性、灵活的信道分配以及较强的抗多址干扰能力,因此在军事通信、卫星通信、移动通信以及室内无线网中得到广泛的应用。理论上可以通过提高系统的扩频增益来对抗任意强度的干扰,代价是传输频带的增加和系统复杂度提高,但在实际应用中,可用的频率资源以及发射/接收机复杂度等限定了系统的扩频增益,当窄带干扰强度超出系统的干扰容限时,系统性能将明显恶化。为了减轻窄带干扰对系统性能的影响,通常的作法是在相关器之前插入一个窄带干扰抑制滤波器,窄带干扰抑制常用的方法有参数估计法和非参数估计法^[1]。

参数估计法也叫时域预测/相减法,利用宽带信号相关性较弱,窄带信号相关性强的特点,用横向滤波器对窄带干扰信号进行估计,再从接收信号中减去对窄带干扰信号的估计。实际应用中,干扰的统计特性未知或随时间变化,需自适应滤波器实现结构,在窄带干扰信号为平稳信号或随时间变化较慢时,预测/相减法效果较好,但当干扰信号随时间变化较快时,处理效果与自适应算法对干扰统计特性变化的跟踪能力以及算法的稳态性能、收敛性能、跟踪性能等有关。

非参数估计法(又称变换域处理法)利用扩频信号和窄带干扰信号在变换域的不同特征来抑制窄带干扰。接收信号中的扩频信号和信道白噪声均匀分布在整个频段,而窄带干扰信号的能量被压缩到有限几个较窄的子带(或谱线)内,通过对包含干扰的子带(或谱线)进行适当处理,可有效抑制接收机中存在的窄带干扰。不同的变换域处理算法主要区别在于以下三个方面^[2]:(1)变换基的选取;(2)干扰检测算法;(3)陷波算法。由于离散傅立叶变换(DFT)可通过高效的快速傅立叶变换(FFT)实现,因此在工程实践中得到了广泛的应用^[3,4]。目前基于 DFT 变换的变换域抗干扰方法主要有:门限裁剪

* 收稿日期 2004 - 11 - 01

基金项目:国防科技重点实验室资助项目(2000JS63.3.1.KG0111)

作者简介:张春海(1976—)男,博士生。

法^[4]、K 谱线法^[5]、条件中值滤波法 (CMF)^[6]等。参数的选择对以上算法的性能有很大的影响,在实际应用中选择合适的参数是十分困难的。

1 系统模型

抗干扰接收机结构框图如图 1 所示,接收信号由期望信号、加性信道噪声和窄带干扰信号三部分组成,其数学表示式为:

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

其中, $s(t)$ 为数据序列经过伪随机码扩频之后,进行 BPSK 调制得到的发射信号; $g(t)$ 为零均值,双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声; $j(t)$ 为窄带干扰信号,可以是单音连续波干扰、多音干扰或者窄带高斯干扰信号。

首先对接收信号进行加窗,然后进行快速傅立叶变换 (FFT),在变换域进行干扰检测,对存在干扰的谱线进行适当处理,以减弱和抑制窄带干扰,经过处理之后进行逆变换 (IFFT),在时域与本地 PN 码相关,经过积分判决得到发送的信息序列。

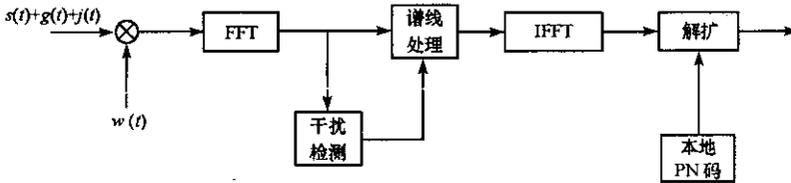


图 1 变换域窄带干扰抑制接收机框图

Fig. 1 Transform domain narrowband interference suppressing receiver diagram

2 拟指数分布干扰检测 (AED) 算法

在 DSSS 系统中,扩频信号由于经过 PN 码扩频,可近似看成是一个白噪声,信道噪声 $g(n)$ 是服从高斯分布的白噪声。在扩展比较大时,到达接收机的信号功率远小于接收机噪声的功率(例如在 GPS 接收机中,期望信号比信道噪声小 30dB 左右),在频域表现为 $|S(k)| \ll |G(k)|$ 。 $X(k)$ 为输入序列 $x(n)$ 经过第 k 个滤波器之后经过下采样的输出,即对高斯白噪声进行 DFT 变换,相当于将其通过一组归一化中心频率分别为 $2\pi k/N$ ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$),频率响应为 $\sin(Nx)/\sin(x)$ 的窄带滤波器之后经过下采样的输出,所以 $X(k) + Q(k)$ 可近似看作是窄带高斯噪声。由窄带高斯分布的性质可知,随机变量 $X(k) + Q(k)$ 的包络服从瑞利分布,包络的平方服从指数分布,相位服从 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布^[7]。

假设信道噪声的功率 $N_0 = 2\sigma_N^2$,扩频信号的功率 $P_s = 2\sigma_s^2 = E_{\text{chip}}/T_c$,则 $|X(k) + Q(k)|$ 服从瑞利分布,且 $\sigma^2 = N(\sigma_N^2 + \sigma_s^2)$, $|X(k) + Q(k)|^2$ 服从参数为 λ 的指数分布,由瑞利分布和指数分布的关系可得 $\lambda = 1/2\sigma^2$,因此在无窄带干扰情况下,可认为接收序列经过 DFT 变换之后得到 N 根谱线的幅度平方服从参数为 λ 指数分布,由指数分布的数字特征可知:

$$E[X] = 1/\lambda, \quad \text{var}[X] = 1/\lambda^2 \quad (2)$$

假定取频域干扰检测门限为 T ,记 $|X(k) + Q(k)|^2$ 不超过该门限的概率为

$$\text{Prob}(|X(k) + Q(k)|^2 < T) = 1 - \int_T^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} dx = p \quad (3)$$

分别取门限 $T = n/\lambda$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$),可以得到表 1 所示的结果。

表 1 谱线幅度平方分布表

Tab. 1 Distribution probability of the square of magnitude

T	$1/\lambda$	$2/\lambda$	$3/\lambda$	$4/\lambda$	$5/\lambda$
p	0.6321	0.8647	0.9502	0.9817	0.9933

变换域干扰检测问题转化为一个假设检验问题,即假设接收机的接收信号中不存在窄带干扰信号,则在 DFT 之后, N 根谱线的幅度平方应服从均值为 $\mu = 1/\lambda$ 、方差为 $\sigma^2 = 1/\lambda^2$ 的指数分布。现在对于任

意一次试验,检验其接收信号中是否有窄带干扰信号的存在。由上面分析可知,当接收信号中无窄带干扰存在时,经过 DFT 变换后,谱线幅度平方大于 $5/\lambda$ 的概率为 0.0067,即在显著性水平 $\alpha=0.0067$ 条件下,可认为谱线幅度平方大于 $5/\lambda$ 是不可能发生的事件,因此,假设检验问题的数学描述可表述如下:

$$\begin{cases} H_0: X(t)=0 \\ H_1: X(t)\neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据表 1 所示,取显著性水平 $\alpha=0.0067$,每次检验的样本容量等于 DFT 的点数 N ,由指数分布的统计特性,取检验统计量为:

$$z = \{ \text{满足 } |X(k)|^2 > 5/\lambda \text{ 的谱线根数} \} \quad (5)$$

当检验统计量满足 $z=0$ 时,认为原假设 H_0 成立;否则,如果 $z>0$,则认为备选假设 H_1 成立。检验的虚警概率为 $P=\alpha=0.0067$ 。实际应用中,当 DFT 变换的点数 N 较大($N>256$)时,谱线幅度平方和的平均值可以作为统计平均值的估计,即

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X(k) + Q(k)|^2 \approx \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

当假设 H_0 成立时,认为接收信号中无窄带干扰存在,此时可直接对谱线进行 IFFT,与本地 PN 码相关,进行积分判决,得到信息序列。如果假设 H_1 成立,则认为幅度平方大于 $5/\lambda$ 的谱线中包含了窄带干扰信号的能量,对相应的谱线进行幅度裁剪或置零,然后重新计算均值 $\mu=1/\lambda$ 的估计 $\hat{\mu}$,再进行上述检验,直到假设 H_0 成立。干扰检测与处理算法的具体步骤描述如下:

(1) 估计均值 $\hat{\mu}$ 。对 N 根谱线幅度平方累加,除以 N 得到样本平均值,作为对 $\mu=1/\lambda$ 的估计 $\hat{\mu}$ 。

(2) 计算门限 $5\hat{\mu}$ 。

(3) 对 N 根谱线进行统计,得到检验统计量 z ,如果 $z>0$,则对幅度平方值大于门限的谱线进行裁剪或置零,如果采取谱线置零法,则下次统计时对均值 $\hat{\mu}$ 进行适当放大。

(4) 返回(1),对处理之后的谱线再次进行检验,直到原假设 H_0 成立为止。

3 数值仿真与分析

仿真系统采用 BPSK 调制,扩频码为取周期为 63 的 m 序列,每一信息比特对应一个完整 PN 码周期,每个 chip 采样一次,用布拉克曼窗对数据段进行加窗,相邻数据段之间重叠 50%。图 2 为多音干扰(三个单音干扰信号)时本文算法的处理效果。其中,三个单音干扰信号的强度均为 $JSR=24\text{dB}$,干扰的归一化频偏分别为 0.3533、0.55、0.777,图中虚线分别对应统计平均值的估计 $\hat{\mu}$ 以及自适应门限 $T=5\hat{\mu}$ 。如图 2 所示,经过 4 次处理之后,所有谱线的幅度平方值都未超过干扰检测门限,此时可认为干扰信号被完全滤除,由表 1 可知,在无干扰信号存在的情况下,谱线的模平方值超过自适应门限的概率小于 0.7%,可认为是不可能发生的,因此在没有干扰信号的情况下,该算法不会对有用信号产生不必要的失真,只有在有干扰信号存在的情况下,该算法才会被激活。从硬件实现的角度来看,算法避免了在 FPGA 中难以实现的求根运算,频域序列的幅度平方可通过计算实部和虚部平方和得到,自适应门限基于模平方和的平均值可直接求出,谱线处理可以通过寄存器清零实现,具有实现简单的优点。

窄带干扰抑制研究中,经常采用插入干扰抑制模块前后相关器输出判决变量的信噪比改善系数 η ,作为对干扰抑制性能评价的一个指标。通常将信噪比改善系数表示为对数坐标的形式:

$$\eta_{\text{dB}} = 10\lg\eta = 10\lg\left(\frac{SNR}{SNR_{\text{no}}}\right) \quad (7)$$

其中, SNR_{no} 和 SNR 分别表示插入抗干扰滤波器前后积分判决变量的信噪比,表 2 给出 $E_b/N_0=8\text{dB}$,取在 10% 信号频带内均匀分布的 10 个单音干扰来模拟窄带干扰,FFT 长度 $N=1024$ 时采用本文算法进行窄带干扰抑制的信噪比改善系数的仿真结果。其中, $SINR$ 为接收信号的信干噪比,从仿真结果可以看出,自适应多门限检测法可显著改善接收机性能。

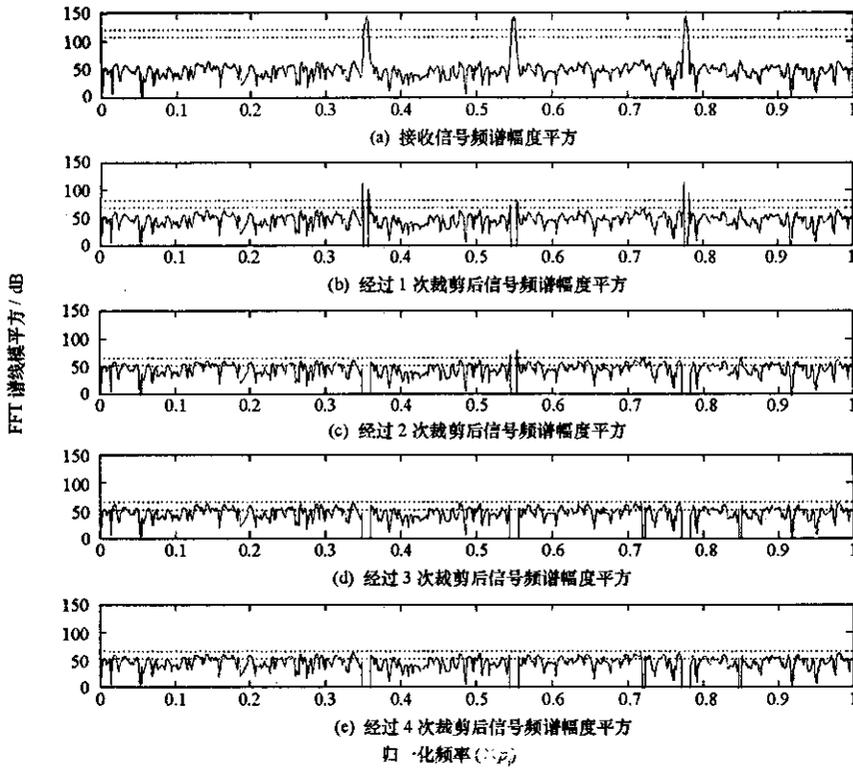


图 2 干扰检测与处理算法效果分析

Fig. 2 Interference detection and suppression performance

表 2 信噪比改善因子 η_{dB} 仿真结果Tab. 2 Simulation results of improvement factor η_{dB}

$SINR$	-30.0	-25.0	-20.0	-15.0
η_{dB}	24.69	20.60	15.30	9.40

信噪比可以用来定性地表示数字通信系统的性能,但不能作为定量指标分析系统性能,误码率常被用于数字通信系统的定量分析。图 3 给出了采用本文抗干扰算法的接收机在无干扰、单音干扰、多音干扰(三个单音干扰)和 AR 模型窄带干扰情况下的误码率曲线,为便于进行性能比较,图中给出了在无干扰条件下的理论性能曲线(用 THE 表示)和 K 谱线法^[6](用 K-bins 表示)的性能曲线。AED 表示基于指数分布假设的窄带干扰检测算法的性能曲线,K 谱线法的基本原理是在 DFT 之后,对谱线按幅度从大到小排序,每次变换将幅度最大的 K 根谱线置零,参数 K 可以根据变换域干扰能量的分布情况取最优的值^[3],为简单起见,仿真中取 $K=8$,即在 256 点 FFT 之后,将幅度最大的 8 根谱线进行置零。从图 3(a) 可以看到,在无窄带干扰信号存在时,由于 K 谱线法将幅度最大的 8 根谱线置零,因此对有用信号的能量具有一定的损失,而采用本文提出的 AED 算法进行处理,谱线的幅度平方值超过门限为小概率事件,因此一般不会在无干扰情况下造成有用信号能量的损失。图 3(b) 为存在一个 $JSR=25\text{dB}$,归一化频率为 0.837 的单音干扰时系统的误码率曲线,可以看出,当存在单音干扰时,AED 算法的性能与 K 谱线法相当,但当单音干扰很强、旁瓣较高时,AED 算法的性能将明显优于 K 谱线法。图 3(c) 为存在三个单音干扰时的仿真结果,三个单音干扰信号的强度分别为 $JSR=25\text{dB}$ 、 15dB 、 20dB ,归一化频率分别为 0.3333、0.577、0.84,此时 K 谱线法通过抑制幅度最大的 8 根谱线已经无法有效抑制干扰,AED 算法则可以有效抑制多音干扰信号。由于需要将谱线幅度平方超过干扰检测门限的谱线置零,因此抑制干扰的同时,也将相应频带上的有用信号抑制了,从而造成一定的信号能量损失。图 3(d) 为存在 AR 模型窄带干扰信号时的情况,AR 模型参数取 $r=0.95$, $\bar{\omega}=\pi/3$, $JSR=25\text{dB}$,从 BER 曲线可以看出,基于指数分布的干扰检测算法可以有效检测和抑制接收信号中存在的 AR 模型窄带干扰信号,当窄带干扰带宽较窄时,K 谱线法也可获得较理想的处理效果,但干扰带宽较大时,AED 算法处理效果将明显优于

K 谱线法。

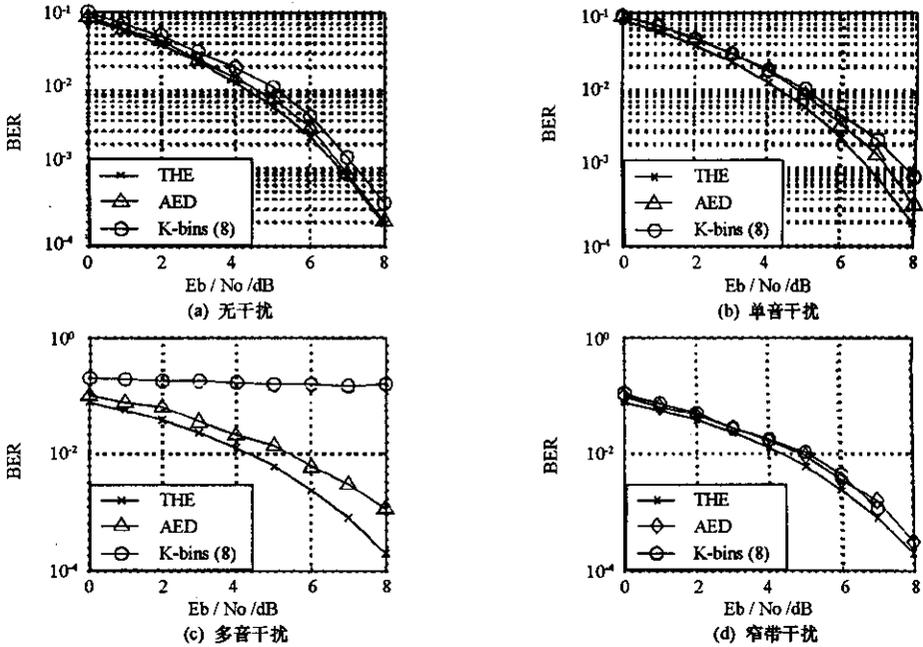


图 3 接收机误码率曲线

Fig. 3 Bit-error-rate curve of receiver

4 结论

本文提出一种基于扩频信号和白噪声之和经过 DFT 之后得到频域序列幅度平方服从指数分布假设下新的干扰检测和处理算法,算法自适应干扰检测门限计算简单,易于在硬件中实现,仿真证明可有效抑制直接序列扩频系统中的单音、多音和窄带高斯干扰等不同样式的窄带干扰信号,并且在无干扰情况下,不会引入期望信号的功率损失。

参考文献:

- [1] Ketchum J W, Proakis J G. Adaptive Algorithms for Estimating and Suppressing Narrow-band Interference in PN Spread-spectrum Systems [J]. IEEE Trans. on Communications, 1982, 30(5): 913 - 924.
- [2] Jones W W, Jones K R. Narrow-band Interference Suppression Using Filter-bank Analysis/Synthesis Techniques [A]. IEEE MILCOM1992 [C], San Diego, 1992: 898 - 902.
- [3] DiPietro R C. An FFT Based Technique for Suppressing Narrow-band Interference in PN Spread-spectrum Communication Systems [A]. IEEE Processing on ICASSP [C], Scotland, 1989: 1360 - 1364.
- [4] Young J A, Lehnert J S. Analysis of DFT-based Frequency Excision Algorithms for Direct-sequence Spread-spectrum Communications [J]. IEEE Trans. on Communications, 1998, 46(8): 1076 - 1087.
- [5] Medley M J, G. Saulnier J, Das P K. Narrow-band Interference Excision in Spread-spectrum Systems Using Lapped Transforms [J]. IEEE Trans. on Communications, 1997, 46(11): 1444 - 1455.
- [6] Kasparis T, Georgiopoulos M, Payne E. Non-linear Filtering Techniques for Narrowband Interference Rejection in Direct Sequence Spread Spectrum Systems [A]. IEEE MILCOM1991 [C], 1991: 360 - 364.
- [7] 罗鹏飞,张文明,刘福声. 随机信号分析 [M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.

