

# 自适应三门限窄带干扰抑制算法

汪 勃<sup>1</sup>, 谌 明<sup>2</sup>, 梁光明<sup>3</sup>, 敖 宇<sup>3</sup>

(1.北京跟踪与通信技术研究所,北京 100086;2.北京遥测技术研究所,北京 100086;  
3.国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 传统的双门限窄带干扰抑制算法存在不能自适应处理大信噪比动态范围接收信号的问题.作者在双门限算法的基础上,提出了自适应三门限窄带干扰抑制算法的基本思想,并结合系统参数研究了门限系数选取方法、干扰检测与抑制方法.仿真结果表明该算法具有优良的抗干扰性能.

**关键词:** 扩频; 频域; 干扰抑制; 门限

**中图分类号:** TN973.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2015)01-0013-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.01.003

## Adaptive Tri-Threshold Narrowband Interference Suppression Algorithm

WANG Bo<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>, LIANG Guang-ming<sup>3</sup>, AO Yu<sup>3</sup>

(1. Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100086, China;

2. Institute of Telemetry Technology, Beijing 100086, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Traditional dual threshold narrowband interference suppression algorithm cannot adaptively process received signal with large SNR dynamic range. Based on dual threshold algorithm, the basic idea of adaptive tri-threshold narrowband interference suppression algorithm was proposed. Combining system parameters, threshold coefficient selection method, interference detection and suppression method were studied. Simulation results show that this algorithm has excellent anti-jamming performance.

**Key words:** spread spectrum; frequency domain; interference suppression; threshold

## 1 引言

频域窄带干扰抑制技术是 DS/FH 通信系统中最常用的一种窄带干扰抑制方法.其原理是利用窄带干扰信号和有用信号在频域上的不同特征来进行区分并消除干扰信号.一般来说,扩频信号功率谱淹没在白噪声电平之下,而强窄带干扰频谱幅值较大,可采用门限法区分干扰和有用信号的频谱.门限法的基本思想是:对于预设的某一门限值,把幅值高于门限值的谱线视为干扰谱,将其置零或置为与门限值相等的幅度.然而,文献[1]指出了门限法的缺陷:若门限设得过高,干扰可能抑制得不完全;若门限设得过低,可能会出现误判而造成有用信号损失.为了解决这个问题,文献[1~3]详细描述了基于前向连续均值去除(Forward Consecutive Mean Excision, FCME)技术的双门限干扰抑制算法.

基于 FCME 的双门限窄带干扰抑制算法已成为一种比较成熟的频域窄带干扰抑制手段,然而,在某些实际通信的场景中,特别是在进行卫星通信时,可能会面临一些新的问题.如果扩频信号功率不是恒定值而是在大动态范围内变化,而同时系统白噪声功率是恒定值,那么接收机接收到的信号信噪比也会在大动态范围内变化.当接收到低信噪比的信号时,双门限算法能够正常识别并抑制干扰;但是当接收到大信噪比的信号时,即使经过频谱扩展,信号主瓣幅度仍然可能会远高于噪声水平,这时双门限算法将难以识别信号和干扰,从而导致算法失效,系统误码率激增而无法正常工作.为了解决这一难题,本文在双门限算法的基础上加以改进,提出了一种结合系统参数的三门限算法.该算法能够完全自适应地识别信号和干扰,并实现干扰抑制.

## 2 干扰抑制系统模型

某扩频通信系统接收机频域窄带干扰抑制模块原理图如图1所示。

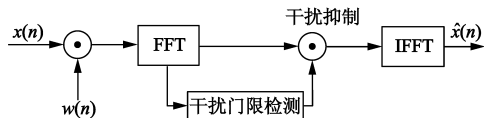


图1 变换域抗干扰原理图

$x(n)$ 为经过带通滤波的中频接收信号序列,包含三种加性分量,可表示为

$$x(n) = s(n) + \eta(n) + i(n) \quad (1)$$

式中  $s(n)$ 表示扩频信号序列,  $\eta(n)$ 表示高斯白噪声序列,  $i(n)$ 表示窄带干扰信号序列.其频谱幅度可表示为

$$\Phi(k) = |X(k)| = |\text{Re}[X(k)] + j\text{Im}[X(k)]|, k = 1, \dots, N \quad (2)$$

在接收信号  $x(n)$ 中,扩频信号与噪声功率之比 SNR 是时变的,  $i(n)$ 是否存在是不确定的,如果  $i(n)$ 存在,干扰信号与扩频信号功率之比 ISR 也是时变的.为了防止频谱泄露,需对输入接收机的采样数据序列  $x(n)$ 按长度  $N$ 进行分段( $N$ 为进行 FFT的点数)并对每段实施加窗操作.为了减小加窗带来的信噪比损失,可将数据序列分为两路采取重叠加窗<sup>[4]</sup>.加窗后,对序列进行 FFT,然后在频域对信号进行窄带干扰检测和处理.最后对干扰处理后的数据进行 IFFT.

## 3 基于 FCME 双门限算法原理及问题分析

算法主要分为两个部分:(1)门限值的计算;(2)干扰检测与抑制.

### 3.1 门限值的计算

FFT之后得到一帧数据的频谱幅值集合  $\Phi(k)$ , ( $k = 1, \dots, N$ ),将  $\Phi(k)$ 按升序排序,然后选择其中幅值最小的  $Q$  ( $Q < N$ )根谱线,认为它们是未受到干扰的有用信号频谱,并将它们记作更新集合.  $Q$ 的值可取  $N$ 的 5% ~ 10%.计算更新集合的均值  $E[\Phi] = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \Phi(i)$ .将  $\Phi(k)$ 中未被选取的其余谱线记作集合  $\Phi'(k)$ , ( $k = Q + 1, \dots, N$ ).

预设低门限系数  $T_l$ 与  $E[\Phi]$ 的积为更新低门限,把  $\Phi'(k)$ 中的值与更新低门限作比较,把所有低于更新低门限的值移入更新集合中.然后重新计算更新集合均值  $E'[\Phi]$ ,并重复上述步骤,直到  $\Phi'(k)$ 中没有值小于更新低门限.记此时的更新集合均值为  $E[\Phi]_{\text{last}}$ .

然后再将预设的高门限系数和低门限系数分别与  $E[\Phi]_{\text{last}}$ 相乘即可得高、低门限.

### 3.2 干扰检测与抑制

在频率轴上从低频开始检索,检索到第一个高于低门限的点记为簇起始点,之后的第一个低于低门限的点记为簇终止点,这之间的频谱记为一个簇.然后在频带内检测出所有的簇,这些簇可能包含干扰在内.然后再将每一簇的最大幅值与高门限比较,若高于高门限,则将该簇判为干扰簇,将谱线幅值置零或进行其他处理;反之则是非干扰簇,无需处理.

### 3.3 算法存在的问题分析

假定某卫星通信系统接收机的系统带宽为  $B = 300\text{MHz}$ ,那么由系统热噪声功率公式  $P_n = kTB$ <sup>[5]</sup>可得系统热噪声功率约为  $-89\text{dBm}$ .假定接收扩频信号功率具有大的动态范围  $-119\text{dBm} \sim -69\text{dBm}$ ,那么接收信号信噪比的动态范围是  $-30\text{dB} \sim 20\text{dB}$ .仿真实验中采用 1024 点 FFT,  $300\text{MHz}$ 的系统总带宽被映射在 1024 点上.为了节省篇幅,下面的仿真结果图中只显示  $0 \sim 150\text{MHz}$ 的频谱而舍去了后半部分的镜像频谱.

当接收机接收到信噪比为  $-30\text{dB}$ 的低功率信号时,采用双门限算法,处理前后的接收信号频谱如图2所示.

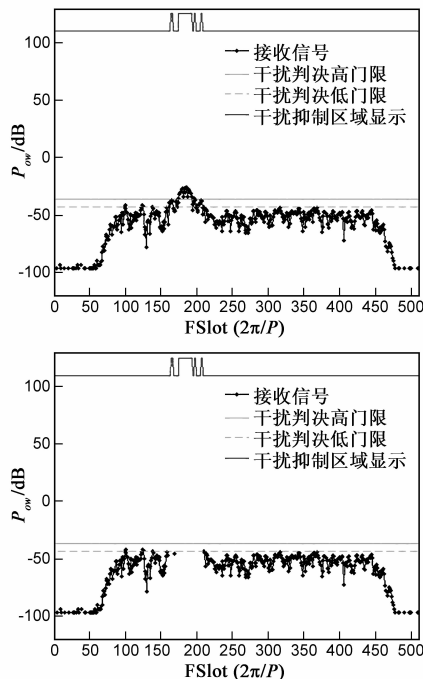


图2 双门限算法处理前后的接收信号频谱(SNR=-30dB)

在图2中,扩频信号频谱淹没在高斯白噪声中,双门限算法正确检测出了窄带干扰并对其采取了置零抑制.

当接收信噪比变化到  $20\text{dB}$ 时,采用双门限算法进行处理.处理前后的接收信号频谱如图3所示.

在图3中,第一个谱峰是信号主瓣,第二个谱峰是

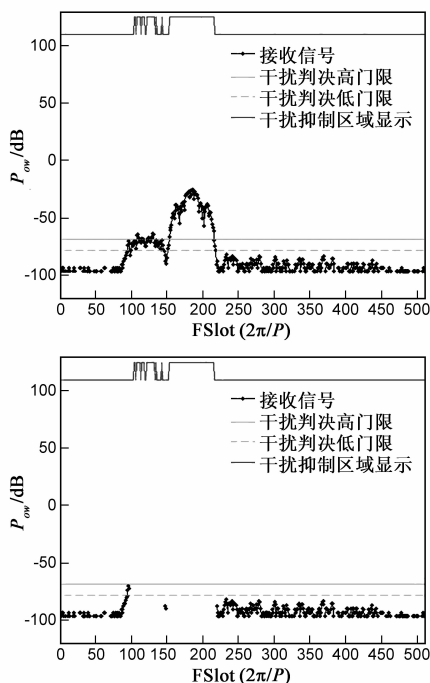


图3 双门限算法处理前后的接收信号频谱(SNR=20dB)

窄带干扰. 由于信号功率较强, 使得主瓣频谱最大幅值超过了高门限, 导致双门限算法把信号主瓣也误判成干扰并进行了抑制, 造成了信号损失.

对于无干扰的纯净强信号, 经过双门限算法处理前后, 接收信号频谱如图 4 所示.

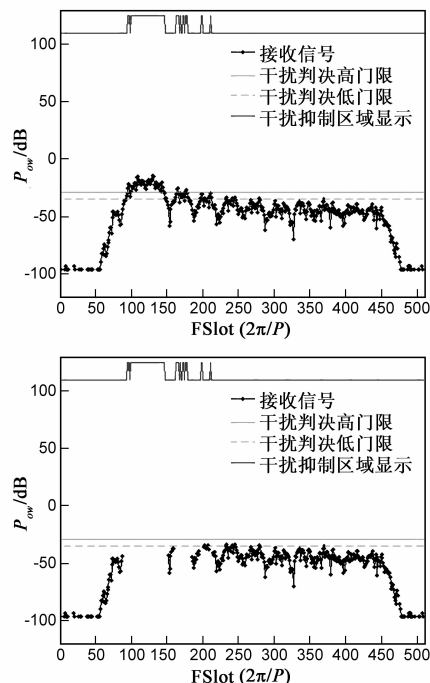


图4 双门限算法处理前后的无干扰接收信号频谱(SNR=20dB)

由图 4 可见, 即使不存在干扰, 采用基于 FCME 的

双门限算法也会使强信号主瓣超过高门限从而导致信号损失.

## 4 三门限算法

为了解决不能根据接收信噪比自适应地抑制干扰的问题, 提出了三门限算法. 算法的基本思想是: 在原来的高低门限之间加入一个中门限, 在弱信号功率下, 中门限可实现原来高门限的功能来对干扰进行抑制; 在强信号功率下, 中门限可实现原来低门限的功能, 以尽量保留有用信号. 本算法尽管能够实现自适应干扰抑制, 但是算法的某些参数必须结合具体通信系统参数来设置. 这里先预设必要的参数: 扩频处理增益为  $G$  (dB), 接收信号最小信噪比为  $\text{SNR}_{\min}$  (dB), FFT 点数为  $N$ , 扩频码片过采样率为  $F_s$ , 码片速率为  $R_c$ , 系统总带宽为  $B$  (Hz), 信号主瓣带宽为  $B_s$  (Hz), 窄带干扰总带宽与系统总带宽之比最高为  $a$ , 另外高、中、低门限系数分别表示为  $T_h$ 、 $T_m$ 、 $T_l$ .

### 4.1 门限系数的选择

三门限算法也包含门限值的计算和干扰检测与抑制两个部分, 门限值的计算这一部分与基于 FCME 的双门限算法是一致的, 只是要选择 3 个合适的门限系数来分别与  $E[\Phi]_{\text{last}}$  相乘得到三个门限值.

基于 FCME 算法得到的门限系数的统计公式是<sup>[6]</sup>

$$T = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{-\ln(P_{\text{FA,DES}})} \quad (3)$$

式中  $P_{\text{FA,DES}}$  表示高斯白噪声的频谱幅度超过以  $T$  为门限系数所得的门限的概率. 文献[2]指出低门限系数选择 1.95 是合适的, 此时  $P_{\text{FA,DES}} = 5\%$ . 为了工程实现的便捷, 可选择低门限系数  $T_l = 2$ , 此时  $P_{\text{FA,DES}} = 4.3\%$ . 在这种情况下, 可近似认为低门限的值等于噪声水平. 中、高门限系数的选择将结合下一小节内容详细说明.

### 4.2 干扰检测与抑制

(1) 首先用低门限对接收信号频谱进行分簇. 然后对所得到的每一簇谱线, 检验簇最大值是否大于中门限, 如果大于中门限, 算法执行下一步; 如果不大于中门限, 则不进行处理.

这是因为, 如果频谱幅度没超过中门限, 那么意味着接收信号要么是纯净的弱信噪比信号, 要么包含低干信比的干扰. 如果存在窄带干扰, 希望这部分低干信比干扰能够被扩频系统的处理增益抑制掉, 那么就要保证中门限与信号功率之比小于处理增益. 由于接收信号的最小信噪比为  $\text{SNR}_{\min}$  (dB), 而低门限近似为噪声水平, 那么只要保证

$$20 \log_{10}(T_m/T_l) - [\text{SNR}_{\min} + 10 \log_{10}(F_s/R_c)] \leq G \quad (4)$$

其中  $10 \log_{10}(F_s/R_c)$  是带内信噪比增益. 依据式(4)即

可选取合适的中门限系数  $T_m$ .

(2)在上一步的检测中,如果簇最大值大于中门限,则记录该簇内大于低门限的频点数量  $M$ . 然后判断  $M$  是否大于  $N * a$ . 这是因为一帧数据做  $N$  点 FFT 后,  $B$  Hz 的带宽在频率轴上被映射为  $N$  点,那么干扰带宽不超过  $Ba$  Hz,映射在频率轴上,干扰谱的频点数就不会超过  $N * a$ .

(3)如果  $M \geq N * a$ ,那么该簇可能是纯净的强信号,也可能包含干扰. 这时需要继续判断簇最大值是否大于高门限. 如果簇最大值大于高门限,则将该簇判为干扰簇;反之不进行处理. 为此,高门限与中门限之比应小于处理增益才能保证可能存在的低干信比干扰在解扩时被抑制. 即

$$20 \log_{10}(T_h/T_m) \leq G \quad (5)$$

依据式(5)即可选取合适的高门限系数.

(4)如果  $M < N * a$ ,那么可判定该簇为干扰簇. 这是因为在通信系统中一般有  $Ba \leq B_s$ ,即窄带干扰带宽不会大于信号带宽. 所以如果  $M < N * a$ ,那么  $M < N * (B_s/B)$ ,这些幅值较大的频点不会是信号.

## 5 仿真结果

在仿真实验中,设扩频系统扩频码长度为 5840,数据速率为 1712 比特/秒,码片过采样倍数为 30,跳频起止点分别为 30MHz 和 130MHz,跳频速率为 20000 跳/秒. 扩频信号中混入窄带干扰,干信比 40dB.

图 5 展示了利用三门限算法处理包含干扰的强信号前后的频谱.

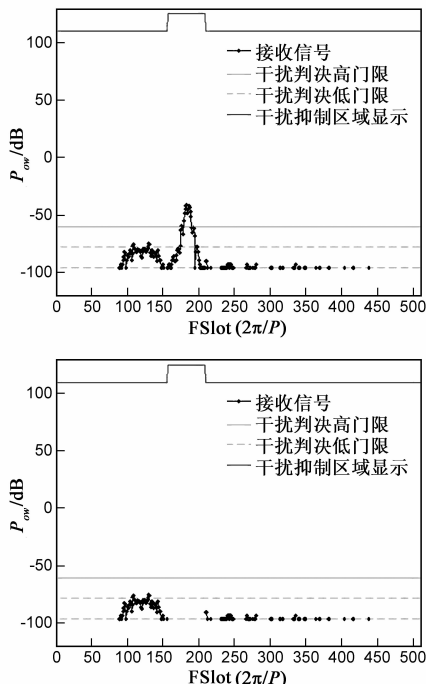


图5 三门限算法处理前后的接收信号频谱(SNR=20dB)

由图 5 可见,干扰被完全抑制的同时,信号主瓣被保留下来. 图 6 是利用三门限算法处理无干扰的纯净强信号前后的频谱.

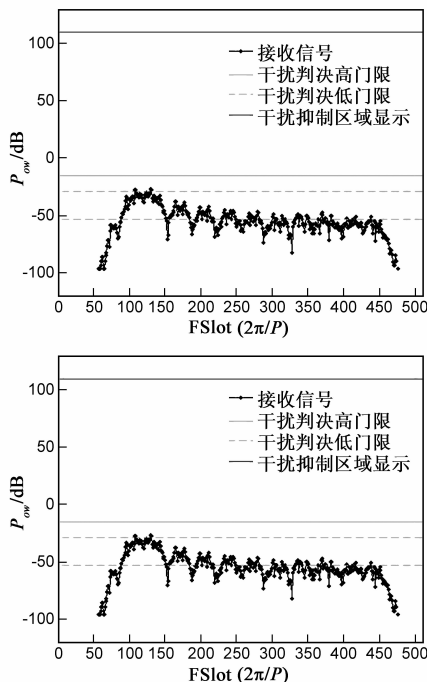


图6 三门限算法处理前后的无干扰接收信号频谱(SNR=20dB)

由图 6 可见,在无干扰的情况下,信号没有任何损失.

对不同信噪比下双门限算法和三门限算法的误码片率进行了仿真,实验结果如图 7 所示.

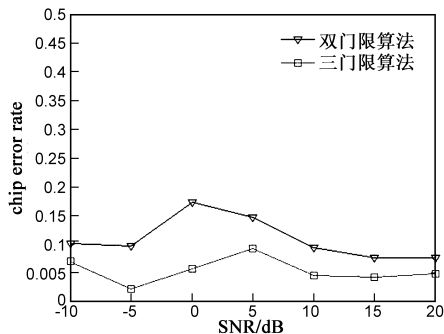


图7 不同信噪比下两种算法的误码片率对比图

由图 7 可见,三门限算法在各个信噪比下的性能均优于双门限算法.

## 6 结束语

针对传统的基于 FCME 的双门限干扰抑制算法的问题,提出了自适应三门限干扰抑制算法,并结合具体的系统参数对算法的门限系数的选择作出了详细分析. 仿真结果也显示三门限干扰抑制算法能够自适应

识别强弱信号和窄带干扰并进行正确处理.理论和实验表明该算法在实际通信系统抗干扰模块中将会发挥重要作用.

#### 参考文献

- [1] J Vartiainen, J J Lehtomaki, H Saarnisaari. Double-Threshold Based narrowband signal extraction[A]. IEEE 61st Vehicular Technology Conference[C]. Piscataway: IEEE Vehicular Technology Society, 2005. 1288 – 1292.
- [2] J Vartiainen, J J Lehtomaki, S Aromaa, H Saarnisaari. Localization of multiple narrowband signals based on the FCME algorithm[A]. Proceedings of the Nordic Radio Symposium[C]. Oulu: Nordic Radio Symposium, 2004, CD-rom.
- [3] Xia C J, An J P, Guo Y Z, Wang A H. Improved suppression algorithm of digital narrowband interference in FFT domain [A]. WiCom 2007 International Conference on Digital Object Identifier[C]. Shanghai: IEEE Communication Society, 2007. 1036 – 1039.
- [4] Wang S, An J P, Wang A H, Bu X Y. A minimum value based threshold setting strategy for frequency domain interference excision[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 501 – 504.
- [5] T Pratt, C Bostian, J Allnutt. 卫星通信(第二版)[M]. 甘良才,等,译.北京:电子工业出版社,2005. 86 – 87.

- [6] P Henttu, S Aromaa. Consecutive mean excision algorithm[A]. IEEE 7th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Application[C]. Prague: Czech Republic, 2002. 450 – 454.

#### 作者简介



汪 勃 男,1968 年出生,安徽铜陵人.1989 年获武汉大学学士学位,2003 年获中国火箭技术研究院硕士学位.现任北京跟踪与通信技术研究所研究员.主要从事航天测控总体技术、扩频测控技术和安全防护技术研究.

E-mail: 18910905773@189.com



谌 明 男,1977 年出生,四川射洪人.2000 年获电子科技大学学士学位.现任北京遥测技术研究所研究员.主要从事扩频通信及抗干扰技术研究.

E-mail: admirebird@sina.com