

# 改进的频域窄带干扰抑制方法

李平博<sup>1</sup>, 王璐<sup>2\*</sup>, 严玉国<sup>1</sup>

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.铁道警察学院,郑州,450053)

**摘要** 针对频域窄带干扰抑制方法的不足,分别提出改进的自适应多门限干扰检测算法和广义延拓逼近算法在干扰抑制中的应用。改进算法使用去除干扰频点之后的频谱进行检测干扰,检测效果有了明显提高;有约束条件的一元函数延拓逼近算法,结构简单,通过延拓逼近思想,减小了对干扰频点处理时信号时域波形的失真。Matlab仿真通过误码率对比验证了算法性能,从而证明改进方法具有更好的干扰检测性能和更优的干扰处理能力。

**关键词** 快速傅里叶变换;窄带干扰;窄带高斯模型;延拓逼近

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.017

**中图分类号** TN914.42 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)01-0078-04

## The Improved Method for Suppressing the Frequency Domain Narrowband Interference

LI Ping-bo<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>2\*</sup>, YAN Yu-guo<sup>1</sup>

(1.The Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2.Railway Police College, Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** For the weakness of the frequency-domain narrowband interference suppression methods, the improved adaptive multi-threshold interference detection algorithms and the application of generalized extended approximation algorithm in interference suppression have been put forward. The improved algorithm used the spectrum to remove the interference continues after detection frequency interference detection effect has been significantly improved; there is an element of constraint extension function approximation algorithm, simple structure, approaching ideas by extension, reducing the time-domain waveform signal processing frequency interference distortion. Matlab simulation verifies the performance of the algorithm throw the contrast of BER, and it is improved the interference detection performance and interference dispose ability of the improved algorithm.

**Key words:** FFT; Narrowband Interference; Narrowband Gaussian model; Extended approximation

直扩通信由于能有效地抑制窄带干扰而得到了广泛的应用和研究<sup>[1-2]</sup>。然而扩频增益是有限的,在强窄带干扰场合必须通过其他方法来进一步提高扩频通信的抗干扰能力。其中,变换域滤波器技术是

抗窄带干扰的一类最有用的方法<sup>[3-4]</sup>。根据信号变换方式、干扰检测和陷波算法的不同,基于变换域的干扰抑制方式有很多,其中,基于傅里叶变换的变换域抗干扰技术由于其实现简单,硬件资源占用少和

收稿日期:2014-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174194);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JM80110)

作者简介:李平博(1989-),男,陕西渭南人,硕士生,主要从事卫星导航抗干扰关键技术研究.E-mail:741151852@qq.com

\*通信作者:王璐(1984-),男,讲师,主要从事网络安全技术研究.E-mail:lemonwyk@163.com

引用格式:李平博,王璐,严玉国.改进的频域窄带干扰抑制方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):78-81. LI Pingbo, WANG Lu, YAN Yugu. The Improved Method for Suppressing the Frequency Domain Narrowband Interference[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 78-81.

处理速度快等优点在工程实践中得到了广泛应用。

基于傅里叶变换的窄带干扰抑制方法一般有 2 个弱点<sup>[4]</sup>:一是难以快速、准确地检测或估计干扰;二是消除干扰的同时容易损伤信号,尤其是对于快时变的复杂干扰。针对问题,本文提出了改进的自适应多门限干扰检测算法和广义延拓逼近算法在干扰抑制中的应用。

### 1 频域窄带干扰检测算法

传统的频域干扰抑制算法基本思路见图 1。

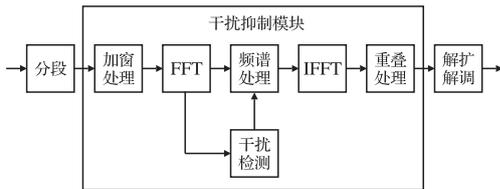


图 1 频域抗干扰接收机原理框图

Fig.1 The functional block diagram of frequency anti-jamming receiver

根据干扰检测机理的不同和频谱抑制方式的区别,频域干扰抑制算法有中值滤波法、权值泄露法、K 谱线法以及门限检测法等。其中门限检测法由于其结构简单,易于工程实现等优点而得到广泛的应用。在门限检测法中,干扰检测门限的设定是关键问题。目前,门限的设定主要有固定门限法和各类自适应门限法等。其中,自适应多门限干扰检测算法<sup>[5]</sup>具有门限设置简单、自适应能力强,并且抑制性能优于传统算法的优点。

#### 1.1 自适应多门限干扰检测算法

当接收信号中没有窄带干扰时,扩频信号和背景噪声的混合信号近似是一个窄带高斯信号<sup>[6]</sup>。其包络  $|S_K + V_K|$  服从瑞利分布,相位在区间  $(0, 2\pi]$  上服从均匀分布,幅度的平方  $|S_K + V_K|^2$  服从指数分布。由指数分布的数字特征可知:

$$E(X) = 1/\lambda, \text{Var}(X) = 1/\lambda^2 \tag{1}$$

假定干扰检测门限为 TH,则  $|S_K + V_K|^2$  不超过门限的概率为:

$$P(|S_K + V_K|^2 < TH) = 1 - \int_{TH}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} dx = P \tag{2}$$

式中取  $TH = 5/\lambda, P = 0.993 3$ 。

自适应多门限干扰检测算法的本质是一个假设检验问题,即假设接收机接收到的信号中没有窄带干扰,接收信号经过 DFT 后, N 根谱线幅度的平方应该服从  $\mu = 1/\lambda, \sigma^2 = 1/\lambda^2$  的指数分布。由以上可知,谱线幅度的平方大于  $5/\lambda$  的概率为 0.006 7,即在显著性水平  $\alpha = 0.006 7$  的条件下,谱线幅度的平方大于  $5/\lambda$  是不可能事件。自适应多门限干扰检测

算法的检测思路即重复对 N 根谱线进行假设检验和干扰裁剪,直到假设成立。

文献[7]提出的基于变异系数切换准则的改进的频域窄带干扰陷波器,克服了 FFT 陷波器的门限效应缺陷,本文在此基础上进行改进。

文献[8]提出的稳健加窗方法——反加窗法,大大减小了加窗效应,提高了接收机对扩频信号的捕获概率,降低了误码率,故本文在重叠处理模块之后添加了反加窗模块。

#### 1.2 改进的自适应多门限干扰检测算法

1.1 节的算法应用前提是接收信号在无窄带干扰时是一个窄带高斯信号。当存在窄带干扰,算法在第一次干扰检测时可以检测出部分窄带干扰,同时对检测出的窄带干扰频谱进行置零或者裁剪。这样在消除干扰的同时,对原扩频信号和背景噪声都带来了影响,改变了信号的统计特性,此时信号已不满足窄带高斯信号模型。而利用剩余谱线再次进行自适应多门限干扰检测,则不会出现上述误检漏检的情况。去除干扰频点的剩余谱线依然满足窄带高斯信号模型。

改进的自适应多门限干扰检测算法在第 2 次及以后进行干扰检测时,由于剩余谱线中不存在已经检测出来的干扰频点,所以,对干扰频点的置零或者裁剪不会影响剩余谱线中窄带干扰的检测。

改进算法的具体步骤如下:

**Step1** 设置初始干扰频点个数  $M = 0$ 。

**Step2** 对  $(N - M)$  根谱线模平方累加,然后除以  $(N - M)$  得到样本平均值,作为对  $\mu = 1/\lambda$  的估计  $\hat{\mu}$ ,并计算门限  $TH = 5\hat{\mu}$  的值。

**Step3** 对  $(N - M)$  根谱线幅度的平方进行门限检测,对超出门限的频点直接置零或进行裁剪。

**Step4** 统计超出门限的谱线个数 M,若为 0,则结束算法;若不为 0,则返回 **Step2**,对处理后的谱线再次进行检测。

### 2 广义延拓逼近算法在干扰抑制中的应用

在频域窄带干扰抑制算法中,对被检测出的干扰谱线进行处理的方法很多,但普遍存在一个问题,即消除干扰的同时对扩频信号也带来了影响,从而使接收机信号捕获时在干扰频点处无法无失真恢复信号。本文对干扰频谱进行广义延拓插值补偿而不是简单的衰减或者置零,使信号在干扰频点和其他频点处同样平稳,即利用与干扰频点相邻的前 n 个频点来广义延拓外推当前干扰频点频谱,减小干扰

频点处理时对信号时域波形的失真。同时针对逼近法不足加入约束条件,使广义延拓插值更符合扩频信号特性。

广义延拓预测模型<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{cases} \min I(a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^n [a_1 + a_2x_i + a_3x_i^2 - U_i]^2 \\ \text{s.t. } a_1 + a_2x_i + a_3x_i^2 = U_i, i = 1, 2, L, n-1 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $a_1, a_2, a_3$  为模型待定参数,一般使用拉格朗日乘法或代入消去法进行求解。

信号经 DFT 变换后干扰频点可以通过一元函数的广义延拓逼近法<sup>[10]</sup>插值处理,广义插值函数为:

$$U(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 \quad (4)$$

可由下列模型确定:

$$\begin{cases} \min I(a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=0}^3 [a_1 + a_2x_i + a_3x_i^2 - U_i]^2 \\ \text{s.t. } \begin{cases} a_1 + a_2x_1 + a_3x_1^2 = U_1 \\ a_1 + a_2x_2 + a_3x_2^2 = U_2 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

为了简化表达式,放松条件,对式(5)求近似解,即:

$$\frac{\partial I}{\partial a_1} = \frac{\partial I}{\partial \lambda_1} = \frac{\partial I}{\partial \lambda_2} \quad (6)$$

解式(6),可得到  $a_1, a_2, a_3$  的代数方程组:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \sum_{i=0}^3 C_i & \sum_{i=0}^3 C_i x_1 & \sum_{i=0}^3 C_i x_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \sum_{i=0}^3 C_i U_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $C_i = x_i^2 - x_1 + x_2x_i + x_1x_2$ 。

由于 DFT 之后的分辨率一定,各结点等距,为计算简便,可令  $x_0 = -2, x_1 = -1, x_2 = 0, x_3 = 1$ ,干扰频点为  $x_4 = 2$ ,由式(15)得  $U(x_4)$ 。即干扰频点的频谱幅度可由干扰点前的 4 个非干扰频点逼近求得,由于逼近法的局部平稳特性,故干扰频点的逼近处理对信号时域波形的失真较小。

由 1.2 节分析可知,无窄带干扰时,不会超过  $\sqrt{5}A$  ( $A$  为幅度均值)。广义延拓逼近法在进行干扰点频谱逼近预测时,由于二次函数的单调性,会出现预测值超出  $\pm\sqrt{5}A$  的情况,即干扰频点经逼近预测后依然表现出干扰特性,这种情况应该避免。故应对  $U(x_4)$  进行约束,即  $-\sqrt{5}A \leq U(x_4) \leq \sqrt{5}A$ ,当不满足约束条件时,由于无窄带干扰信号频谱满足高斯特性,故可以对  $U(x_4)$  进行跳变处理,即  $U(x_4) \pm 2\sqrt{5}A$  以使其满足约束条件。

### 3 数值仿真

为了验证改进自适应多门限干扰检测算法和广

义延拓逼近法性能,给出 MATLAB 仿真。PN 码采用 63 bit 的 m 序列,通过 BPSK 调制,载波频率为 70 MHz,采样频率为 1.024 MHz,数据加 1 024 点的汉明窗,FFT 长度取 1 024 点,重叠处理为 50%重叠选择,其后添加反加窗模块,反窗宽度为 512 点,系数由汉明窗中间部分的 512 个系数取倒数得到。

图 2 为接收信号中存在 2 个窄带干扰时第一次使用自适应多门限干扰检测算法的相关仿真图,图中标出的门限 1 即为第一次干扰检测时的设置门限,则可知干扰 2 被检测出来,由于干扰 1 比干扰 2 功率更小,因而没有被检测出来。

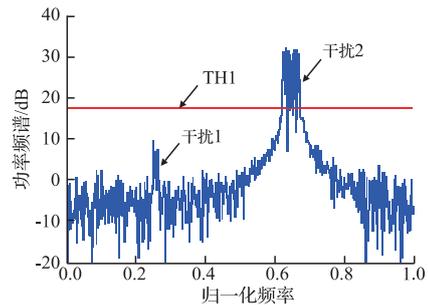


图 2 第 1 次算法使用时的检测门限

Fig.2 The suppressing threshold of algorithm first used

图 3 为第 2 次使用自适应多门限干扰检测算法时的相关仿真图,图中门限 2~4 分别为传统自适应多门限干扰检测算法中干扰抑制使用小衰减法(这里衰减系数取为 0.01)、置零法和改进的自适应多门限干扰检测算法时的干扰检测门限。

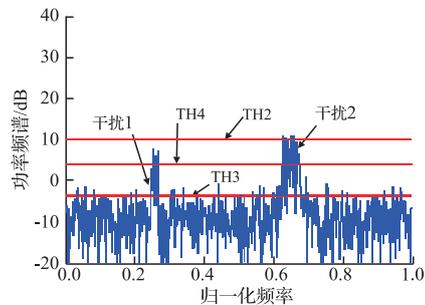


图 3 第 2 次算法使用时的检测门限

Fig.3 The suppressing threshold of algorithm second used

由图可知,小衰减时(门限 2)干扰 1 未被检测出来,从而产生漏检;置零时(门限 3)部分扩频信号也被认为是干扰成分,从而产生误检;而改进的自适应多门限干扰检测算法(门限 4)由于不使用检测出来的干扰成分,故将干扰 1 检测出来,且不存在误检情况,其干扰检测效果要优于传统干扰检测算法。

图 4 为信干比 -35 dB 时采用干扰频谱置零和广义延拓逼近法得到的误码率曲线对比图,为了便于比较,将不加抗干扰的理论值和仿真值以及理论值也进行了仿真。可以看出,改进的自适应多门限干扰检测算法具有好的干扰检测性能,故干扰频谱

置零法和广义延拓逼近法都可以很好地减小误码率,同时,后一种方法误码率更小,在抑制干扰的同时对原扩频信号进行了插值预测,弥补了时域信号的失真。

为了说明文献[7]提出的基于变异系数的自适应多门限干扰检测算法的必要性,现将传统自适应多门限干扰检测算法与无干扰抑制时的误码率对比如图5。从图中可以看出,在强干扰时,自适应多门限干扰检测算法抑制效果较好,但当干扰较弱时,抑制算法反而破坏了系统性能,接收机匹配滤波器性能优于抑制算法。故图4取信干比-35 dB时,不加抗干扰理论值和仿真值基本一致。

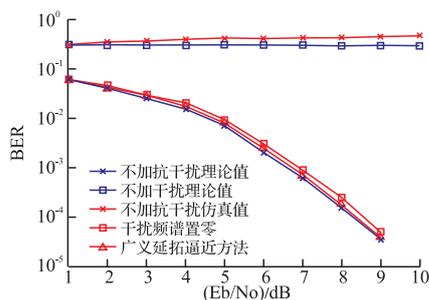


图4 信干比为-35 dB时的误码率对比图

Fig.4 The BER comparison diagram in SJR of -35 dB case

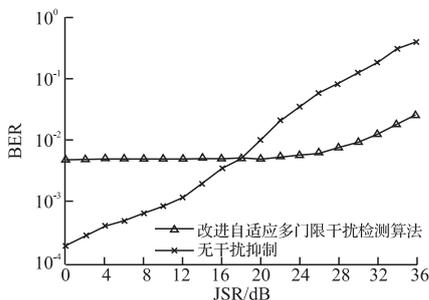


图5 误码率随干信比变化曲线对比图

Fig.5 The variety comparison diagram of JSR to BER

## 4 结语

改进的自适应多门限干扰检测算法对不同干扰环境都具有较好的干扰检测效果,克服了传统方法不足;广义延拓逼近算法以延拓逼近的思想对干扰频点处的原扩频信号进行预测插值,是干扰抑制方面的新思路,通过仿真也验证了逼近效果要优于直接干扰置零处理。改进算法简单、实用,可以为频域抗干扰后续研究提供参考,也可应用于工程实践。

## 参考文献(References):

[1] 黄剑明, 保铮. 基于扩频通信的抗干扰陷波技术研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 508-512.  
HUANG Jianming, BAO Zheng. Study on Notch Filter Technology Based on Spread Spectrum Communication[J]. Chi-

nese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 508-512. (in Chinese)

- [2] LU Dan, WU Ren-biao, SU Zhi-gang, et al. Two stage GPS Anti-jamming Processor for Interference Suppression and Multipath Mitigation[C]//IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE press, 2007: 746-749.
- [3] 柏廷广, 邵定蓉, 李署坚, 等. 变换域窄带干扰抑制技术与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4290-4419.  
BAI Yanguang, SHAO Dingrong, LI Shujian, et al. Narrow-band Jamming Suppression Method and Simulation in Transform-Domain[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16): 4290-4419. (in Chinese)
- [4] 于雨, 王呈贵, 郭富强. 针对变换域窄带干扰抑制的干扰研究[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(3): 37-39.  
YU Yu, WANG Chenggui, GUO Fuqiang. Research on Jamming Transform-Domain Suppression of Narrow-Band Interference[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(3): 37-39. (in Chinese)
- [5] 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.  
ZHANG Chunhai, XUE Lijun, ZHANG Eryang. Narrowband Interference Suppression in Transform Domain Based on Adaptive Multi-threshold Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(3): 461-465. (in Chinese)
- [6] 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.  
LUO Pengfei, ZHANG Wenming, LIU Fusheng. Analysis of Random Signal[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [7] 王爱华, 夏彩杰, 安建平, 等. 改进的频域窄带干扰陷波器[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(12): 1098-1101.  
WANG Aihua, XIA Caijie, AN Jianping, et al. An Update on Algorithms for Narrowband Interference Suppression in Frequency Domain[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(12): 1098-1101. (in Chinese)
- [8] 杨晓波, 王薇. 一种扩频系统频域干扰抑制稳健加窗方法研究[J]. 电视技术, 2011, 35(7): 128-131.  
YANG Xiaobo, WANG Wei. Study on Robust Windowing Technology of Frequency Domain Interference Suppression in Spread Spectrum System[J]. Video Engineering, 2011, 35(7): 128-131. (in Chinese)
- [9] 孙希延, 纪元法, 施讲立, 等. 基于GPS软件接收机的抗窄带干扰方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(1): 77-79.  
SUN Xiyan, JI Yuanfa, SHI Huli, et al. Suppression Method for Narrow-band Interference in GPS Receiver software[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(1): 77-79. (in Chinese)
- [10] 施讲立, 颜毅华, 徐国华. 工程科学中的广义延拓逼近法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
SHI Huli, YAN Yihua, XU Guohua. The Method of Extended Approximation in Science and Engineering[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2005. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)