

引用格式: 罗欣羽, 冯平. 基于加权检测算法的低频时码干扰检测研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 298-307.

基于加权检测算法的低频时码干扰检测研究

罗欣羽^{1,2,3}, 冯平^{1,2,3}

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 封开低频时码授时台, 肇庆 526500

摘要: 针对低频时码信号的干扰检测问题, 提出了一种新的加权检测算法。该算法通过两个加权因子, 对信号平均功率和载波功率进行加权计算得到参考门限, 实现对干扰的检测判决。相比于干扰检测中常用的能量检测算法, 改进后的加权检测算法受干扰影响较小, 对干扰特别是大功率干扰的检测有效率更高, 在信噪比 $SNR > 0$ 时, 干扰检测有效率最高可达到 98.3%。此外, 该算法可根据信号信噪比灵活调整参考门限, 是一种适用于低频时码信号的干扰检测算法。

关键词: 低频时码; 干扰检测; 能量检测算法; 加权检测算法

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0298-10

Research on low frequency time code interference detection based on weighted detection

LUO Xin-yu^{1,2,3}, FENG Ping^{1,2,3}

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Fengkai Low Frequency Time Code Time Service Station, Zhaoqing 526500, China

Abstract: A new signal weighting detection algorithm is proposed for interference detection in the low-frequency time code signals. The algorithm uses two weighting factors to average the signal power and carrier power, which is used as referencing threshold for the detection and judgment of interference. Compared with the commonly used energy detection algorithms for interference detection, the proposed weighted detection algorithm is less affected by interference, and has higher detection efficiency in detecting interference, especially for the high-power interference. When signal to noise ratio ($SNR > 0$), its interference detection rate can reach to 98.3%. In addition, the algorithm can flexibly adjust the referencing threshold according to SNR. This signal weighting detection algorithm is a suitable interference detection algorithm for low-frequency time code signals.

Key words: low-frequency time code; interference detection; energy detection algorithm; weighted detection algorithm

0 引言

低频时码授时技术是国际电信联盟 ITU 推荐使用的授时技术，其信号传播稳定，覆盖范围广泛，具有较强的绕射能力，可为水下、室内、城市峡谷等卫星信号接收困难的区域提供授时服务^[1-2]。低频时码授时系统是我国时间频率服务保障体系中的重要组成部分，为进一步推动低频时码技术的产业化应用，在不断提升系统授时精度和发播质量的同时，也要加强低频时码信号的抗干扰能力，提高接收端信号质量^[3-4]。其中，对干扰的检测是开展抗干扰技术研究的基础和关键。

目前众多的干扰检测技术都是基于贝叶斯、最大似然等相关准则^[5]，如匹配滤波算法、循环平稳检测算法、基于高阶统计量的检测算法和能量检测算法等，主要应用在 GNSS（Global Navigation Satellite System）和 OFDM（orthogonal frequency division multiplexing）信号的干扰检测上。诺斯在 1943 年提出匹配滤波器理论^[6]，该算法用于干扰检测时需要根据信号的先验信息和参数来设计相应的滤波器，实用性不强。循环平稳检测算法利用待检信号统计特征函数的周期特性来实现干扰检测，其检测能力强但算法复杂度较高^[7]。协方差矩阵检测^[8-9]等基于高阶统计量的算法也可以对频谱干扰进行检测识别，但这类算法计算量大，不易于工程实现。王桁瑶^[10]最先使用最大似然估计算法对干扰频率进行估计，其通过迭代使用频率转换、滤波、加权相位平均等方法对单频干扰实现精准估计和重构，但该方法迭代次数过多，实现较为复杂。能量检测算法^[11]复杂度低，易于实现，是最常用的检测算法。CME（consecutive mean excision）算法^[12-13]和 FCME（forward consecutive mean excision）算法^[14-15]是基于能量检测算法改进的迭代门限检测算法，可根据信号噪声变化更新检测门限，但实际使用时会出现连续迭代计算得到的参考门限过低，导致检测误检率过高的情况。

针对以上问题，本文提出了一种加权检测算法，来实现对低频时码信号的干扰检测。该算法通过对信号平均功率和载波功率加权计算获得参考门限，完成后续干扰判决。其受干扰影响较小，可灵活调整参考门限且对干扰的检测有效率更高，具有更高实际应用价值，是一种更加适用于低频时码信号的干扰检测算法。

1 低频时码授时系统

本节对低频时码信号特点及其系统中常见的单频干扰进行了介绍，这是开展后续研究的基础。

1.1 低频时码信号

低频时码（呼号 BPC）授时系统的载波频率为 68.5 kHz，发射信号采用脉宽调幅体制。图 1 是低频时码信号的时域波形，其下降脉冲的起始点，指示着 UTC（NTSC）秒的发生时刻，下降脉冲的宽度，根据制定的传输协议给出日历和时间的数字编码信息，调制速率为 1 bit/s。其波形函数可表示为

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \times \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式（1）中： $\cos(2\pi f_c t)$ 为信号载波，载波频率 $f_c = 68.5$ kHz； $\sum_n a_n g(t - nT_s)$ 为 BPC 的数字调制信号，其中 $g(t)$ 是以 0 s 为起点，持续时间为 T_s 的矩形脉冲， T_s 恒为 1 s； $n \in [0, N]$ ， N 为时码个数； a_n 是调制信号的幅值，可将其表示为：

$$a_n = \begin{cases} 0.1A, & nT_s \leq t \leq nT_s + \tau_s \\ A, & nT_s + \tau_s < t < (n+1)T_s \end{cases} \quad (2)$$

式（2）中， A 为脉冲信号的峰值电压，单位为 V； τ_s 为下降脉冲的持续时间，可取 0.1、0.2、0.3 和 0.4 s。

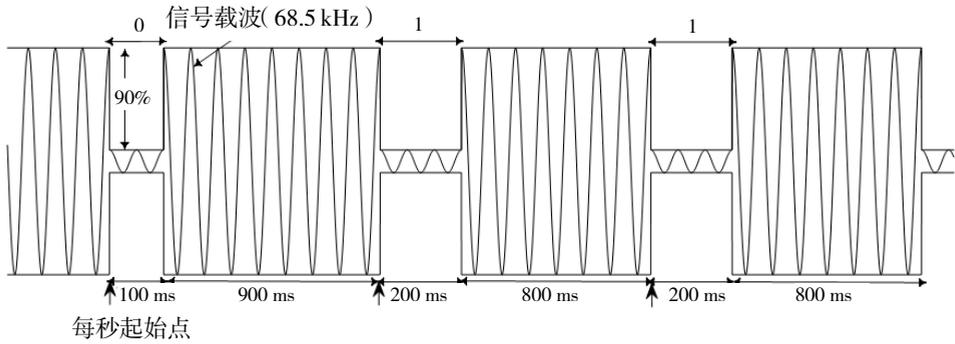


图 1 低频时码信号时域波形

在对低频时码信号进行接收时,最关注信号场强、载波相位、误码率以及解码后的授时偏差等性能。若信号中存在干扰,不仅会影响信号场强、相位与误码率的计算,还会造成对下降脉冲起始点和下降脉宽的误判,导致信号解码失败。

1.2 单频干扰

低频时码系统中最常引入的干扰是单频干扰^[16],该干扰在时域上连续,频域上仅有单一频点,是最普遍和典型的干扰类型。其他如多频干扰、窄带干扰、宽带干扰等干扰形式在频域上也可看作是由若干单频干扰组合而成。

可将单频干扰表示为

$$J_s(t) = \sqrt{p}e^{j(2\pi f_0 t + \theta_0)} \quad (3)$$

式(3)中, f_0 为单频干扰的中心频点, p 为干扰信号的功率, θ_0 为干扰的初始相位。

多个单频干扰即组成了多频干扰,频域上有多个频点,可表示为

$$J_m(t) = \sum_i \sqrt{p_i} e^{j(2\pi f_{i0} t + \theta_{i0})} \quad (4)$$

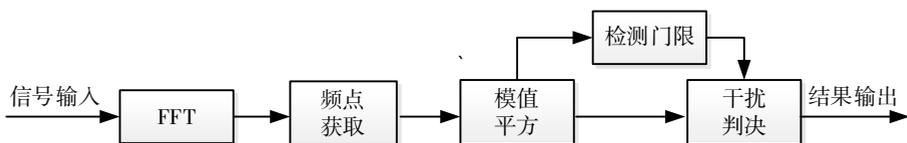
通常当干扰功率较大、干扰频点接近或进入目标信号的带宽范围时,即会对信号的监测和接收解码造成影响。

2 干扰检测算法

本节首先概述了干扰检测流程,并通过对能量检测算法性能的研究分析,结合低频时码信号的特点,提出了一种更适用于低频时码信号的加权检测算法。

2.1 干扰检测流程

干扰检测流程如图 2 所示,信号数据经 FFT (fast Fourier transform) 由时域转换到频域,取信号频点计算模值平方后,与干扰检测算法计算的参考门限对比,判决得到干扰频点。后续可对检测得到的干扰频点进行置 0 或扩展插值处理^[17],以减小干扰对目标信号影响。此外,为防止对 BPC 信号误判,还需要在干扰判决前对信号频谱进行载波去除处理。



注: FFT 为快速傅里叶变换

图 2 干扰检测流程

2.2 能量检测算法

干扰检测中的参考门限可由不同检测算法计算获得，能量检测算法是最常用的干扰检测算法之一。式(5)展示了能量检测算法参考门限的计算公式，如式(5)所示，能量检测算法的参考门限 A_{thre} 由信号平均功率与 T 的乘积求得。

$$A_{\text{thre}} = T \times \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} |X(n)|^2 \quad (5)$$

式(5)中， N_s 为信号频点数， $X(n)$ 为信号频点幅值， T 为根据期望虚警概率 P_f 求出的门限因子^[18]。通常取 P_f 为 0.05，此时 $T=1.953$ 。

能量检测算法受干扰影响较大，若干扰功率过大，会导致计算的参考门限过高，部分干扰漏检；若干扰功率过小，则会造成参考门限过低，易将噪声频点误检为干扰。此外，能量检测算法的门限因子是基于检测统计量的包络模值近似服从瑞利分布的基础上求得的，不适用于低频时码信号。

2.3 加权检测算法

考虑到低频时码信号的频谱有一个明显的载波峰值，不能采用瑞利分布虚警概率计算的参考门限进行干扰检测。同时对于低频时码信号，功率相对较小的干扰对其几乎无影响。因此，本文提出了一种加权检测算法，以实现低频时码信号的干扰检测。

如式(6)所示，该算法综合考虑了信号平均功率和载波功率，并结合两个加权因子计算得到参考门限：

$$A_{\text{thre}} = \alpha \times \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} |X(n)|^2 + \beta \times P_{\text{bpc}} \quad (6)$$

式(6)中， P_{bpc} 为低频时码的载波功率， α ， β 是两个加权因子。

通过调整信噪比 SNR (signal-to-noise rate) 的大小，分析能量检测算法门限值与信号载波功率的变化关系，如图3所示，可得二者比值与信噪比成负指数关系。

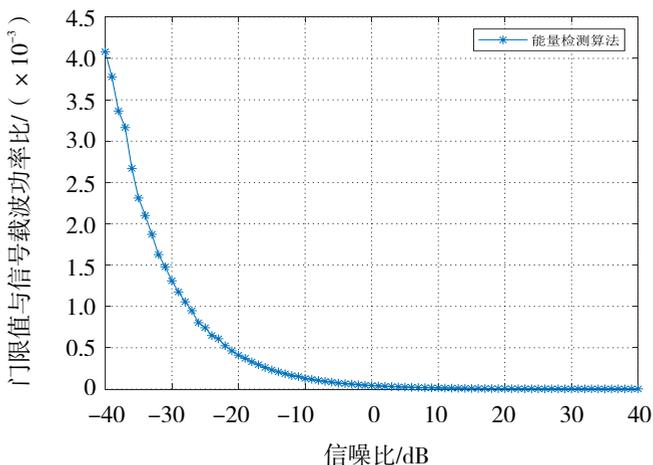


图3 能量检测门限与信号载波功率关系图

在此基础上，结合 BPC 信号频谱特点，将加权因子设为：

$$\begin{cases} \alpha = 1 - \beta \\ \beta = ae^{b \times |R_{\text{SNR}}|} \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中, R_{SN} 为信噪比, a, b 为两个参数, 经多次仿真实验, 将参数值确定为:

$$\begin{cases} a = 3 \times 10^{-5} \\ b = 0.1 \end{cases} \quad (8)$$

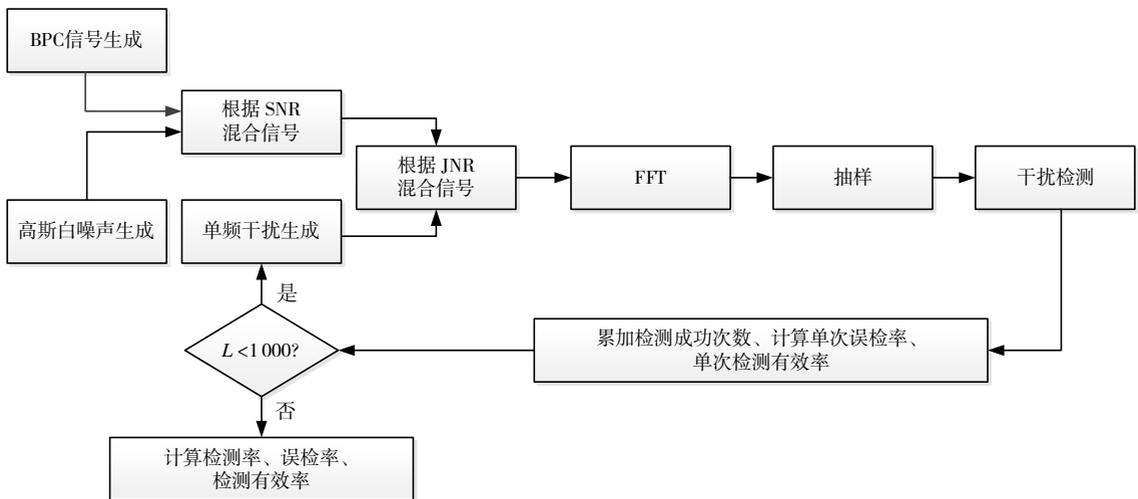
即:

$$\begin{cases} \alpha = 1 - \beta \\ \beta = 3 \times 10^{-5} e^{0.1 \times |R_{SN}|} \end{cases} \quad (9)$$

加权检测算法形式简单, 易于实现, 且可根据信号信噪比对参考门限进行调整。通过加权因子控制, 可在 SNR 较大时适当增加门限, 以减少甚至忽略对小功率干扰的检测; 在 SNR 较小时, 也可防止参考门限因过低的载波功率而变得极小, 导致干扰误检率激增。因此这是一种更加适用于低频时码授时信号的干扰检测算法。

3 实验验证及结果分析

为验证加权检测算法对 BPC 信号的干扰检测性能, 本节设置实验对比了能量检测算法和加权检测算法的检测结果, 图 4 给出了仿真实验的流程图。通过比较两种算法的检测率、误检率和检测有效率, 对算法性能进行分析。



注: SNR 为信噪比, JNR 为干噪比, FFT 为快速傅里叶变换, L 为检测次数

图 4 仿真实验流程

实验中用到的 BPC 信号和干扰信号均由前文公式仿真获得, 其中信号采样率为 1 MS/s, 信号时长为 5 s, 干扰信号为单频干扰, 干扰频点随机取自 9~150 kHz 范围内。根据实际 BPC 信号的接收信噪比 SNR 范围, 实验中分别将 SNR 设为 -10、0 和 10 dB, 干噪比 JNR (jammer-to-noise ratio) 的取值范围为 -40~20 dB, 经 FFT 和抽样后取 1/2 信号频点数 $N_s = 2500$, 每个 JNR 值下重复 $L = 1000$ 次实验计算检测率、误检率和检测有效率。

其中, 检测率和误检率的定义为:

$$\text{检测率} = \frac{\text{检测成功次数}}{\text{检测次数}}, \quad (10)$$

$$\text{误检率} = \frac{1}{\text{检测次数}} \sum_{i=1}^L \frac{\text{误检频点数}}{N_s - 1} \quad (11)$$

考虑到脱离误检率单看检测率意义不大，且在误检率较低时检测率高才有实际应用价值，因此本文引入一个新评价指标——检测有效率。并将检测有效率定义如下：

$$\text{检测有效率} = \frac{1}{\text{检测次数}} \sum_{i=1}^L \frac{\text{正确检测频点数}}{\text{正确检测频点数} + \text{误检频点数}} \quad (12)$$

对于单频干扰，若检测结果中存在干扰频点，即视为检测成功。图5给出了SNR为10 dB，JNR为4 dB，干扰频点 $f_0 = 60$ kHz时的干扰检测效果图。图5(a)为经过FFT运算后的信号频谱图，图中左侧尖峰为单频干扰，右侧尖峰为BPC信号。图5(b)为干扰检测结果图，图中蓝线为信号频谱，红线为干扰检测结果。从图5(b)可以看出，红线在单频干扰频点处与干扰谱线表现一致，而在其他频点处其值恒为0，即可认为本次干扰检测成功，且无其他频点被误检。

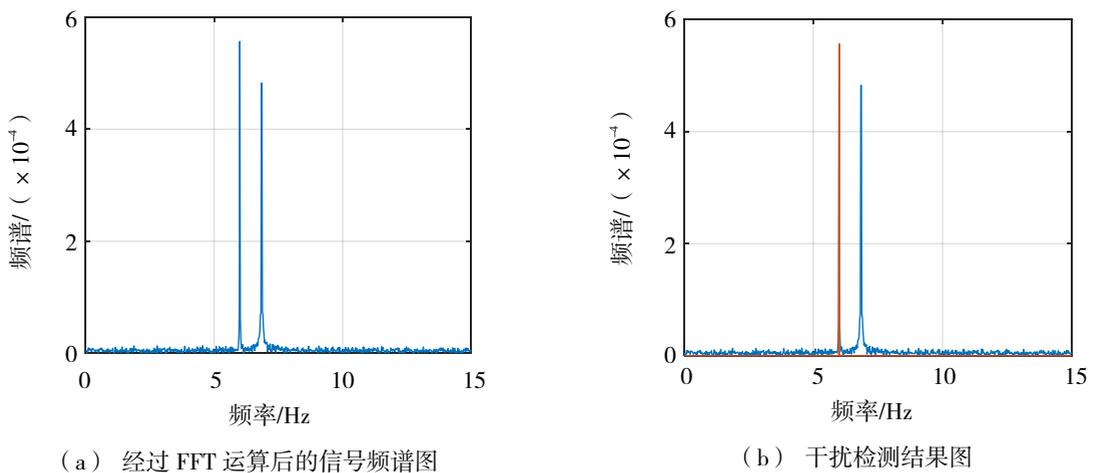
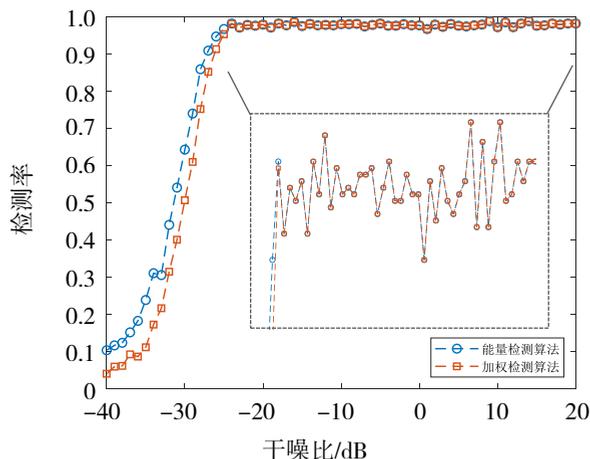


图5 干扰检测效果图

3.1 SNR为-10 dB下的干扰检测

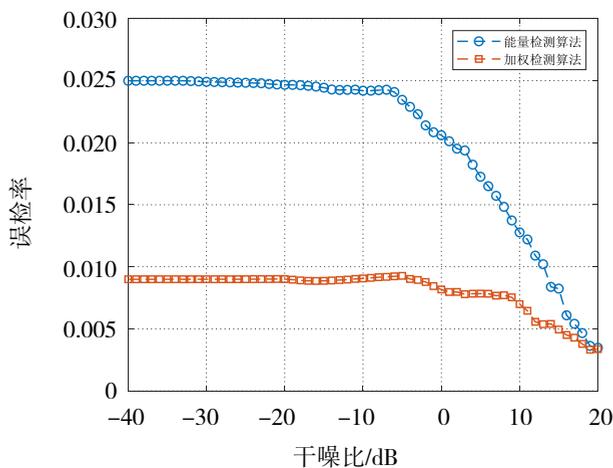
由图6(a)可以得出，此时两种算法的检测率均随JNR增大而逐渐上升，最后在某值保持相对稳定。这是因为判决环节前对频谱做了载波去除处理，出现在频谱处理范围内的干扰信号无法被成功检测到，因此算法检测率会在趋近1的某一位置保持上下波动。当 $JNR < -23$ dB时，加权检测算法检测率略低于能量检测算法；当 $JNR \geq -23$ dB时，加权检测算法的检测率与后者一致。



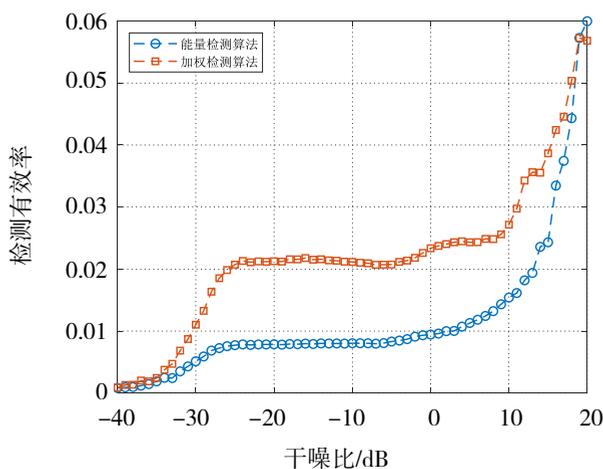
(a) 检测率

图 6 (b) 反映了两种算法误检率的变化情况。随着 JNR 增大, 能量检测算法误检率受干扰影响迅速下降, 而加权检测算法误检率下降趋势略缓, 且在 $-40 \text{ dB} \leq \text{JNR} \leq 20 \text{ dB}$ 范围内加权检测算法误检率始终比能量检测算法低。

由图 6 (c) 可知, 在 $-40 \text{ dB} \leq \text{JNR} \leq 18 \text{ dB}$ 范围内加权检测算法检测有效率始终大于能量检测算法, 且在 $-27 \text{ dB} \leq \text{JNR} \leq 15 \text{ dB}$ 时两者差值均不小于 0.01。



(b) 误检率



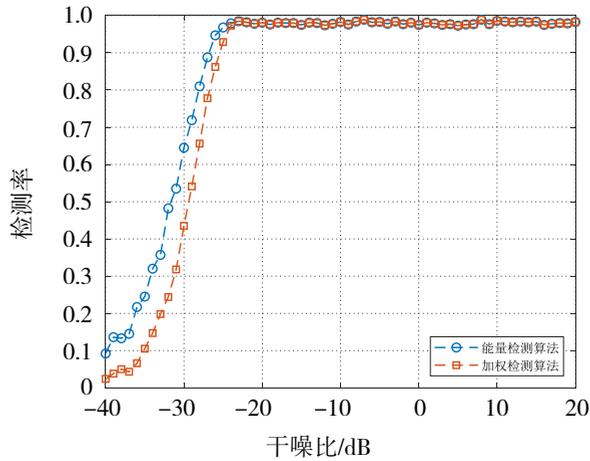
(c) 检测有效率

图 6 SNR 为 -10 dB 的算法检测性能

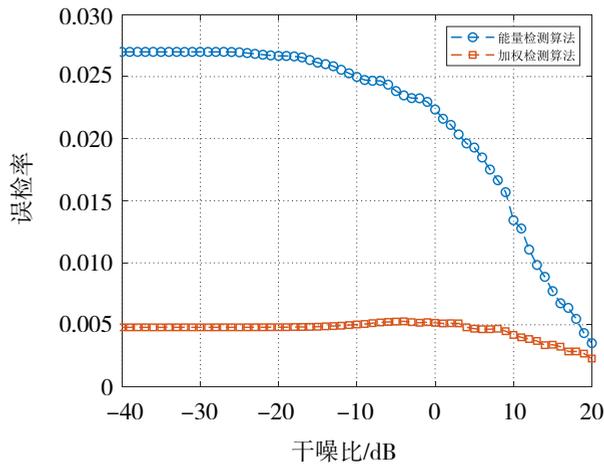
由上述分析可知, 当干扰功率较小时, 能量检测算法的检测率略比加权检测算法高, 但此时前者也容易将噪声误检为干扰, 干扰检测有效性低; 当干扰功率增大到一定值时, 加权检测算法可在更低的误检率下与前者保持一样的检测率, 其干扰检测有效性更高。可以得出结论: SNR 为 -10 dB 时, 加权检测算法检测有效性更高, 算法性能更好。

3.2 SNR 为 0 dB 下的干扰检测

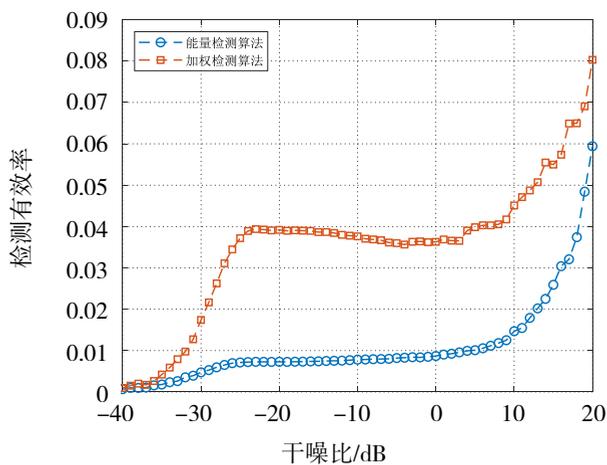
由图 7 可知, SNR 为 0 dB 时两种算法检测性能与前文大致相似。两算法误检率同样随着 JNR 增大而下降, 且加权检测算法误检率下降趋势略缓。与前文不同的是, SNR 为 0 dB 时加权检测算法门限经 SNR 调整适当增加, 其误检率要比 SNR 为 -10 dB 时更低, 检测有效率则比 SNR 为 -10 dB 时更高。相比能量检测算法, 其算法性能得到进一步提升。



(a) 检测率



(b) 误检率



(c) 检测有效率

图 7 SNR 为 0 dB 的算法检测性能

3.3 SNR 为 10 dB 下的干扰检测

SNR 为 10 dB 时, 能量检测算法性能仍与前文类似, 但加权检测算法性能与前文差距较大。由图 8(a) 可知, 其检测率在 $JNR \leq -16$ dB 时始终为 0, 在 $JNR > -16$ dB 时迅速拔升, 然后在 $JNR \geq -12$ dB 时进入

相对稳定状态,此时干信比为 -22 dB ;其误检率在 $JNR \leq 3\text{ dB}$ 时恒为 0 ,在 $JNR > 3\text{ dB}$ 时开始略微上升,呈现阶梯式增长;其检测有效率在 $-15\text{ dB} \leq JNR \leq 20\text{ dB}$ 范围内均大于能量检测算法,且在 $-13\text{ dB} \leq JNR \leq 4\text{ dB}$ 范围内表现极佳,与后者差值恒大于 0.94 ,检测有效率最高可达到 0.983 ,而在 $4\text{ dB} < JNR \leq 20\text{ dB}$ 范围内,受误检频点数阶梯式增长影响,其检测有效率呈阶梯式下降曲线,但仍明显高于能量检测算法。

可知在 SNR 为 10 dB ,信号功率较大时,加权检测算法可直接忽略功率相对较小的干扰,且对于大功率干扰,其检测有效率极高。因此相比能量检测算法,此时加权检测算法具有极高的检测有效性和实际应用价值。

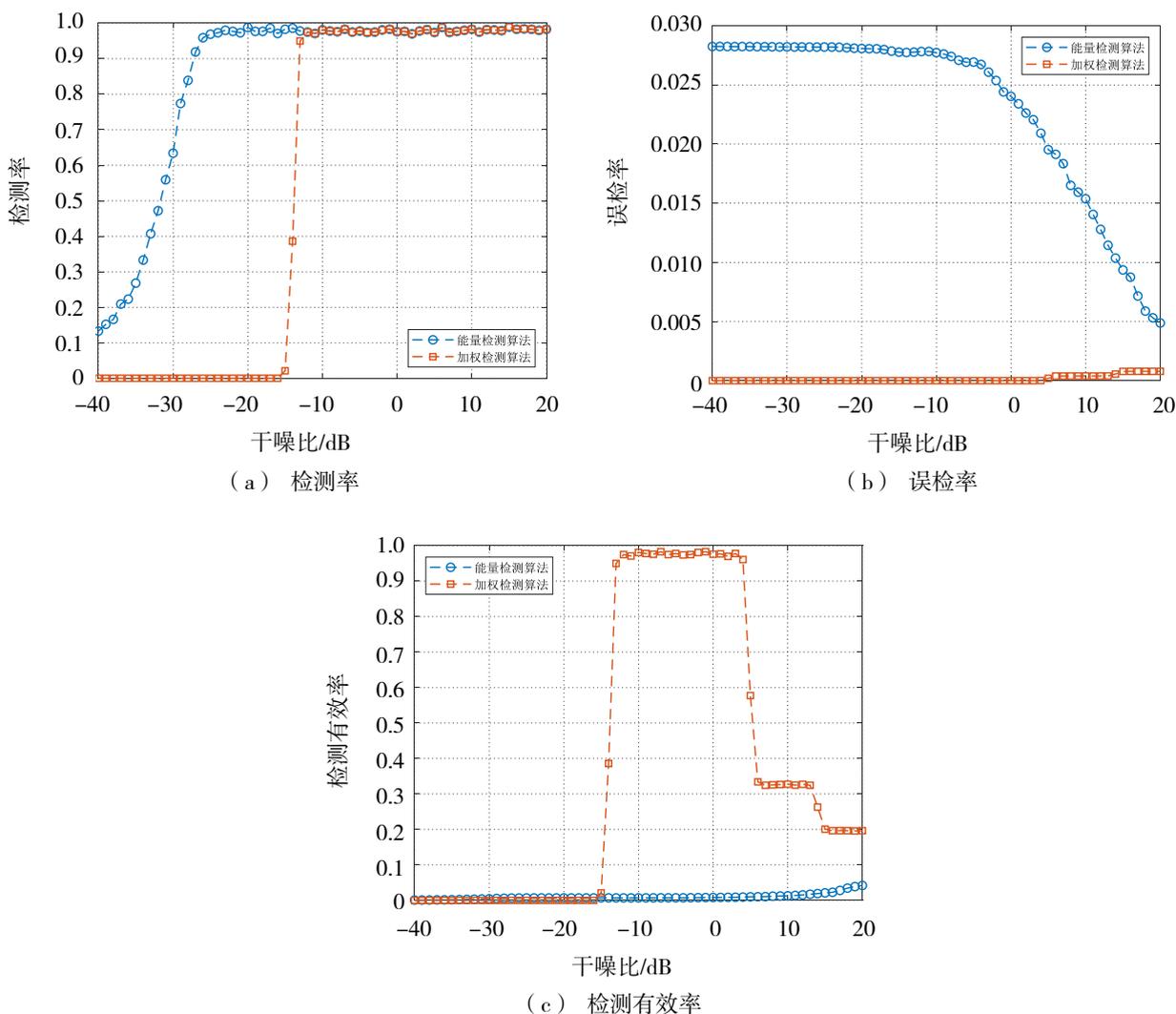


图 8 SNR 为 10 dB 的算法检测性能

综合分析可得:当 $SNR \leq 0$ 时,相比能量检测算法,加权检测算法对BPC信号的干扰检测有效性更高;当 $SNR > 0$ 时,加权检测算法可忽略功率相对信号较小的干扰,且对于大功率干扰,其检测有效率高,实际应用价值更高。此外,加权检测算法性能受干扰影响也更小。当 $SNR \leq 0$ 时,加权检测算法的参考门限由信号平均功率和载波功率共同决定,其值会因干扰功率变大略微增大,但在加权因子控制下其受影响程度也比能量检测算法低,算法性能较后者更为稳定;当 $SNR > 0$ 时,加权检测算法参考门限主要由载波功率决定,几乎不受干扰影响。但随着干扰功率变大,干扰频点周围频点功率也受影响变大,导致其误检率略微增加,检测有效率有一定程度的下降。

4 结语

本文提出了加权检测算法来解决 BPC 信号的干扰检测问题, 并通过仿真实验对其检测性能进行了比较分析。与能量检测算法相比, 加权检测算法对干扰的检测有效性更高, 算法性能受干扰影响更小, 更具有实际应用价值。同时, 加权检测算法具有形式简单、易于实现的特点, 且可根据信号信噪比对参考门限进行灵活调整, 更适用于实际 BPC 信号的干扰检测分析。后续将通过进一步优化加权因子, 提高加权检测算法对 BPC 信号的干扰检测性能。

参考文献:

- [1] 刘军. 低频时码授时系统中的若干理论与工程设计实验研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2002.
- [2] 戴顺, 罗近涛, 刘海文, 等. 2020年6月21日日环食低频时码信号监测[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 215-221.
- [3] 闫温合, 华宇, 李实锋, 等. 增强型罗兰信号非系统干扰测量误差模型研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 300-309.
- [4] 杨丽春. 通信抗干扰技术的综合优化及评价研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [5] 朱付强. OFDM系统中快速频谱检测关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [6] 郭朝斌. OFDM接收机恶意干扰检测与抑制技术及其FPGA实现研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] GARDNER A. Signal interception: a unifying theoretical framework for feature detection[J]. IEEE Transactions, Communications, 1988, 36(8): 897-906.
- [8] ZENG Y H, LIANG Y. Covariance based signal detections for cognitive radio[J]. IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007: 202-207.
- [9] ZENG Y H, LIANG Y. Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1804-1815.
- [10] 王桁瑶, 张晓瀛, 王杉. 单音干扰下 OFDM 系统中频域迭代干扰消除算法[J]. 信号处理, 2016, 32(10): 1169-1177.
- [11] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [12] HENTTU P, AROMAA S. Consecutive mean excision algorithm[J]. IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications, 2002(2): 450-454.
- [13] VARTIAINEN J, LEHTOM K J J, SAARNISAARI H, et al. Estimation of signal detection threshold by CME algorithms[C] // 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference, Milan: [s.n.], 2004: 1654-1658.
- [14] VARTIAINEN J, KI J L, SAARNISAARI H, et al. Limits of detection for the consecutive mean excision algorithms[C] // Proceedings of the International Conference. Cognitive Radio Oriented Wireless, Cannes: Network Commence, 2010.
- [15] SAARNISAARI H, HENTTU P. Impulse detection and rejection methods for radio systems[C] // Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, 2003: 1126-1131.
- [16] 何江. 复杂环境下 GNSS 抗干扰策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [17] SUN X Y, YUANFA J, SHI H L, 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.
- [18] 邓荣平. 支持航空通信信号波形设计的频谱检测技术研究是实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.