

基于间隔自相关的跳频跳时信号突发检测

赵 慎¹, 戴卫华^{2*}, 周开军¹, 李世玲¹, 覃业梅¹

(1. 湖南工商大学智能工程与智能制造学院, 湖南长沙 410205;
2. 信息工程大学信息工程学院, 河南郑州 450001)

摘要: 针对强雷达干扰下跳频跳时通信信号突发检测困难的问题, 本文提出一种基于间隔自相关系数的检测方法. 在每个跳频频率子信道上, 以雷达最大脉宽为相关长度和间隔单元, 分别取两段相邻信号计算间隔自相关系数, 基于跳频跳时信号的间隔自相关系数远大于雷达脉冲、随机噪声相关系数的特征, 通过逐点滑动和组合阈值方式, 确定各子信道的突发时刻和结束时刻, 并根据各子信道信号突发时间的衔接关系, 完成跳频跳时通信信号的检测. 仿真结果表明, 在强干扰条件下, 该方法能有效克服雷达干扰, 对跳频跳时信号突发检测的检测概率接近于 1. 真实电磁环境试验结果表明, 该方法受强雷达脉冲干扰影响小, 可实现准确检测.

关键词: 雷达干扰; 跳频跳时信号; 突发检测; 子信道; 间隔自相关系数; 跳频频率; 组合阈值

基金项目: 国家自然科学基金(No.61976088); 湖南省重点研发计划(No.2024AQ2033); 湖南省自然科学基金(No.2024JJ9188)

中图分类号: TN914.4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)12-3985-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20231133

Frequency Hopping/Time Hopping Signal Burst Detection Based on Interval Autocorrelation

ZHAO Shen¹, DAI Wei-hua^{2*}, ZHOU Kai-jun¹, LI Shi-ling¹, QIN Ye-mei¹

(1. School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205, China;

2. School of Information Systems Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: A detection method based on interval autocorrelation coefficient (IAC) is proposed to address the difficulty of burst detecting frequency hopping/time hopping (FH/TH) communication signal under strong radar interference. On each hopping frequency sub channel, the maximum pulse width of the radar is used as the correlation length and interval unit, and two adjacent signals are extracted to calculate the IAC. In terms of the feature that the IAC of the FH/TH signal is much greater than the correlation coefficient of the radar pulse and random noise, the detection of the FH/TH signal can be achieved by confirming the burst-time and end-time of each sub channel, which are determined by point-by-point sliding and combined threshold method, and utilizing the cohesive relation of the burst time of each sub channel. The simulation results illustrate that, under the condition of strong interference, the proposed method can effectively overcome the radar interference and the burst detection probability of FH/TH signal is nearly close to 1. The real electromagnetic environment test results state that the method is less affected by interference of strong radar pulse, and is able to achieve relatively accurate detection.

Key words: radar interference; FH/TH signal; burst detection; sub channel; interval autocorrelation coefficient; frequency hopping frequency; combination threshold

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61976088); Key Research and Development Program of Hunan Province (No.2024AQ2033); Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2024JJ9188)

1 引言

跳频(Frequency Hopping, FH)通信具有抗干扰、抗信道衰减、组网方便和低截获概率等突出优点,是兼具先进性能和高技术难度的无线通信技术,在民用和军用无线通信领域均有重要应用,例如无人机飞控数传^[1,2]、军用FH战术电台^[3]和战术数据链^[4]等。FH通信技术的优异性能源自其独特的调制方式:信号载波频率随着时间跳变,跳变规律具有伪随机性,跳变范围远超过窄带通信带宽。常规FH通信技术的每个FH频点驻留时间相同,且稳定不变。少数FH通信场景中,每个FH频点驻留时间是变化的,其时长变化具有伪随机性,即为跳频跳时(Frequency Hopping/ Time Hopping, FH/TH)通信技术^[5,6]。目前FH/TH通信主要用于军事无线通信^[7],在美军战机上应用较多,比如P3C、F16等。与常规FH通信相比,FH/TH通信信号伪随机性更强,检测难度也更大。

常规FH信号检测方法相对成熟,主要包括匹配滤波检测方法^[8]、能量检测方法^[9]、多跳自相关检测方法^[10]和时频分析检测方法^[11]等。匹配滤波检测方法需要已知FH信号大部分先验信息,如跳频图案、跳速以及调制波形等,在非盲场合检测效果好;能量检测方法计算简单,当已知频率集和跳速时,对高斯噪声适应良好,但在有色噪声背景下容易出现虚警和漏警。以上两种方法均需进行信道化处理,即依据频率集,在各子信道上滤波、提取分量,并分别进行检测。多跳自相关检测方法无需信道化,利用存在/不存在跳频两种场景时多跳之间相关结果的差异,检测跳频突发,其抗噪能力强、检测率高,但仅适用于恒定跳速。与前三种方法不同,时频分析检测方法直接对宽带采样信号进行时频分析,基于图像处理算法完成FH信号检测^[12-14]、估计跳频频率、突发时刻和跳速等参数,适合非盲和全盲场景,亦不依赖信道化,手段灵活、适用性强,但计算复杂,时频检测精度不高。

由于FH/TH通信信号无恒定跳速,不能直接应用上述方法对其检测。考虑到FH/TH信号是特殊的FH信号,经典方法不能估计跳速,但对突发时刻和结束时刻的检测,仍有部分借鉴价值。同时,无论何种检测方法,干扰均会影响检测性能。以多跳自相关检测方法为例,当干扰与信号相关时,虚警和漏警概率增大;同样,在干扰频繁猝发场合,时频分析方法检测率下降。为此,近年来相关研究逐渐聚焦于复杂电磁环境下的干扰抑制与FH信号检测^[15,16],以应对非相关宽带、定频、随机猝发和扫频干扰等。实际战场电磁环境更复杂,普遍存在强烈的主动雷达脉冲干扰,其功率大、脉宽小、周期猝发、全频带覆盖,干信比高达数十分贝以上,时频分析方法可能失效。即使采用信道化滤波处理,雷达脉冲

在各子信道也将残留与FH/TH信号相关性很强的频率分量,严重影响能量检测和多跳自相关检测方法的性能,故抑制雷达脉冲干扰是各检测方法的主要预处理措施:利用主动雷达脉冲的大功率和周期猝发特征,先在时/频域检测雷达脉冲干扰位置,进行抵消抑制,之后再检测FH信号。实际复杂电磁环境下,雷达脉冲形式多样,脉宽和重复周期变化频繁,实时检测和抑制雷达脉冲并非易事。

针对强雷达脉冲干扰下的FH/TH通信信号突发检测问题,本文利用FH/TH信号的特征,提出一种基于间隔相关系数(Interval Autocorrelation Coefficient, IAC)的检测算法:在各子信道上,以雷达脉宽最大值为相关长度和间隔单元的参考值,分别截取子信道基带信号的两段波形,逐点滑动计算其相关系数,即IAC;通过检测各子信道IAC的突变位置以及不同子信道IAC突变位置是否衔接,确定FH/TH信号突发。相比于现有方法,该算法无需抑制强雷达干扰即可实现FH/TH通信信号突发检测。

2 检测算法原理

2.1 强雷达干扰条件下的FH/TH信号模型

考虑实际电磁环境,天线接收信号表示为

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

其中, $s(t)$ 、 $r(t)$ 、 $j(t)$ 和 $w(t)$ 分别为FH/TH通信信号、强雷达干扰、其他干扰和噪声信号。

雷达干扰 $r(t)$ 的能量强,在部分子信道上残留强分量,不仅与FH/TH信号相关,且幅度远高于后者。信道化之后,第 m 个子信道上的基带信号为

$$x_m(n) = s_m(n) + r_m(n) + w_m(n) \quad (2)$$

其中, $s_m(n)$ 、 $r_m(n)$ 和 $w_m(n)$ 分别为FH/TH信号、雷达干扰和带限噪声在第 m 个子信道上的基带分量。

设FH/TH信号子信道数为 M ,频率集为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$,频点驻留时长集为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$,各子信道的频率、驻留时长均按伪随机规律变化,频点频率共切换 K 次。记其第 m 个子信道的基带分量为

$$s_m(n) = d(n) \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) \quad (3)$$

其中, $d(n)$ 、 $g_{m,k}(n)$ 分别为基带信号和单位窗函数。仅当第 k 次频率切换前驻留频点等于 f_m 时, $g_{m,k}(n)$ 取值为1,否则为0。进一步,FH/TH信号由所有子信道基带分量表示为

$$s(n) = \sum_{m=1}^M s_m(n) e^{j(2\pi f_m n T_s + \theta_0)} \quad (4)$$

其中, θ_0 为载波初相, T_s 为采样间隔。显然,当接收信号无噪声和干扰时,通过多次下变频、低通滤波,将 $s(n)$ 分别信道化,可得到各子信道基带分量 $s_m(n)$ 。

2.2 IAC 定义

对天线接收信号进行信道化处理,以第 m 个子信道为例,得到基带信号 $x_m(n)$ 后逐点计算 IAC 为

$$\rho_m(n) = \frac{\mathbf{x}_m(n) \cdot \mathbf{x}_m^H(n+I)}{\|\mathbf{x}_m(n)\| \cdot \|\mathbf{x}_m(n+I)\|} \quad (5)$$

其中, H 表示共轭转置运算, $\|\cdot\|$ 表示取模运算; $\mathbf{x}_m(n)$ 为由 $x_m(n)$ 的第 n 个点至第 $(n+I-1)$ 个点构成的向量; $\mathbf{x}_m(n+I)$ 为由 $x_m(n)$ 的第 $(n+I)$ 个点至第 $(n+2I-1)$ 个点构成的向量,即

$$\begin{cases} \mathbf{x}_m(n) = [x_m(n), \dots, x_m(n+I-1)] \\ \mathbf{x}_m(n+I) = [x_m(n+I), \dots, x_m(n+2I-1)] \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x}_m(n)$, $\mathbf{x}_m(n+I)$ 代表取自 $x_m(n)$ 的两段间隔为 I 的信号,且信号长度为 I . 随着 n 增加,两段波形向右滑动. $\rho_m(n)$ 表示天线接收信号第 m 个子信道的 IAC. 信号长度 I 取值至少按雷达脉宽的最大值取整,但同时不超过雷达脉冲重复周期最小值的一半,即

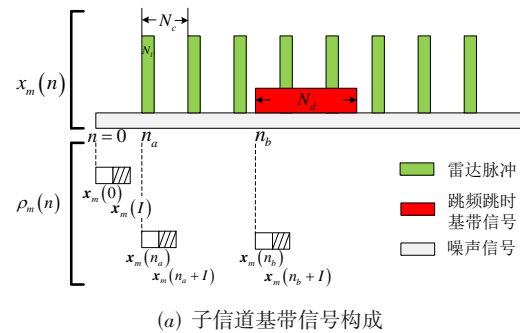
$$\begin{cases} I \geq \text{floor} \left(\max_{1 \leq l \leq L} (N_l) \right) \\ I < 0.5 \cdot \text{floor} \left(\min_{1 \leq c \leq L} (N_c) \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中, N_l 表示第 l 种雷达脉宽, N_c 表示第 l 种雷达脉冲重复周期. 通常情况下,雷达脉冲波形、脉宽复杂多样,甚至多达数十、数百种,且随时间变化. 理论上应对每种脉宽计算 IAC,但计算量巨大. 本文保守采用最大脉宽作为相关长度,虽然略损失相关检测性能,但仅需计算一次 IAC,可显著减少运算量,有助于实时检测. 同时,为保证相邻两段波形中不出现相同雷达脉冲波形,间隔相关长度应小于雷达脉冲重复周期的一半. 在此约束下, I 的量值一般在数十微秒级,显著小于脉冲重复周期和跳频驻留时长.

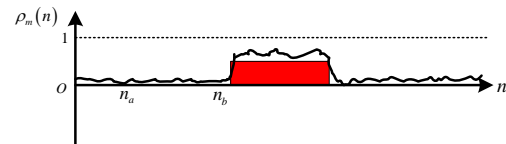
2.3 IAC 计算及其特征分析

天线接收信号的第 m 个子信道基带信号 $x_m(n)$ 包含 FH/TH 基带信号、雷达脉冲分量和带限噪声. 取雷达脉冲宽度为 N_l , 重复周期为 N_c ($N_l < N_c$). FH/TH 基带信号突发时刻为 n_b , 驻留时长为 N_d ($N_l < N_d$). $x_m(n)$ 各主要成分时域分布和 IAC 计算原理如图 1(a) 所示. 在各子信道上,带限噪声一直存在,雷达脉冲呈周期性间歇分布,而 FH/TH 基带信号呈突发间歇分布,且雷达脉冲幅度强于 FH/TH 基带信号的幅度. 由式(7)取 $I=N_l$ 为相关长度和间隔单元,从 $n=0$ 开始向右滑动,依次计算 IAC 过程中,将包含带限噪声的自相关系数 ρ_w 、雷达脉冲分量与带限噪声的相关系数 ρ_{sw} 、FH/TH 基带信号的自相关系数 ρ_s 、FH/TH 基带信号与带限噪声的相关系数 ρ_{sw} 、FH/TH 基带信号与雷达脉冲分量的相关系数 ρ_{sr} 等. 由相关系数定义,它们取值范围为 $[-1, 1]$. 显然,带限噪声的自相关系数绝对值远小于 1,即 $|\rho_w| \ll 1$; 雷达脉冲

分量与带限噪声几乎不相关,即 $|\rho_{rw}| \ll 1$; FH/TH 基带信号的自相关系数接近 1,即 $|\rho_s| \approx 1$; FH/TH 基带信号与带限噪声基本不相关,即 $|\rho_{sw}| \ll 1$; FH/TH 基带信号与雷达脉冲分量具有一定相关性,即 $0 < |\rho_{sr}| < 1$. 因此,在 FH/TH 基带信号突发位置, $x_m(n)$ 的 IAC 绝对值 $|\rho_m(n)|$ 显著大于其他位置处的结果,表现出窗函数形式. 波形示意如图 1(b) 中曲线所示,红色矩形为突发位置.



(a) 子信道基带信号构成



(b) IAC 波形

图 1 接收信号的子信道基带信号及其 IAC 计算原理

与能量检测方法和多跳自相关方法相比, IAC 取值压缩在 $[-1, 1]$ 之间,且受噪声、雷达干扰变化影响小,可检测信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、信干比(Signal to Jamming Ratio, SJR)动态范围更大,虚警率和漏警率更低. 依据上述特征, IAC 可为强雷达脉冲干扰下的 FH/TH 信号突发检测提供良好基础.

2.4 突发时刻与结束时刻检测

强雷达脉冲干扰下,在 FH/TH 通信信号的突发位置,天线接收信号的子信道 IAC 呈现窗函数的特征,故可通过检测其上升沿和下降沿,判定突发时刻和结束时刻. 以第 m 个子信道为例,检测步骤如下:

- (1) 计算接收信号各子信道的 IAC 绝对值 $|\rho_m(n)|$, 其大小范围为 $[0, 1]$;
- (2) 为减小噪声和雷达干扰等影响,以长度为 I 的单位窗函数,对 $|\rho_m(n)|$ 进行平滑滤波;
- (3) 设定阈值 $0 < \lambda < 1$, 从 $n=0$ 开始顺序检测 $|\rho_m(n)|$ 中窗函数的上升沿突变点和下降沿突变点,分别标记为 n_{up} 和 n_{down} . 上升/下降沿突变点判定准则:若 n_1 的前 I 个点 $|\rho_m(n)|$ 的均值小于 0.5λ . 后 I 个点 $|\rho_m(n)|$ 的最小值大于 λ , 则判定为上升沿突变点 $n_{up}=n_1$; 若 n_2 的前 I 个点

$|\rho_m(n)|$ 的最小值大于 λ ,且后 I 个点 $|\rho_m(n)|$ 的均值小于 0.5λ ,则判定为下降沿突变点 $n_{\text{down}}=n_2$.

阈值 λ 直接影响上升沿和下降沿的判定,其合理取值与SNR等因素相关.直观上,大SNR场景下 λ 取值稍大,如 $\lambda=0.6$;小SNR场景下 λ 取值稍小,如 $\lambda=0.3$.根据FH/TH信号突发前后IAC的变化,可初步界定阈值 λ 的理论取值范围为

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda > 0 \\ \lambda > E \left\{ \left| \rho_{s,m}(n) + \frac{1}{\sqrt{\text{SJR}_0}} \rho_{sr,m}(n) \right| \right\} \cdot \text{SJR}_0 \\ \lambda < E \left\{ \left| \rho_{s,m}(n) + \frac{1}{\sqrt{\text{SJR}_0}} \rho_{sr,m}(n) \right| \right\} \cdot \text{SNR}_0 \\ \lambda < 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

其中, SNR_0 、 SJR_0 、 SJR_0 分别是未取对数的SNR、SJR和信干噪比; $\rho_{s,m}(n)$ 为FH/TH信号的IAC, $\rho_{sr,m}(n)$ 为FH/TH信号和雷达脉冲的间隔相关系数; $E\{\cdot\}$ 表示期望运算.式(8)需要计算各成分的间隔相关系数,且依赖统计结果,实际应用中存在诸多不便.

2.5 检测时刻排序和FH/TH信号突发确认

对天线接收信号各子信道的IAC采用串行或并行处理方式,假设检测出 J 对上升沿和下降沿突变点时刻,按从小至大的顺序分别将上升沿时刻和下降沿时刻进行排序,排序后分别记作:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{up}} = \{n_{\text{up}}^1, n_{\text{up}}^2, \dots, n_{\text{up}}^J\} \\ N_{\text{down}} = \{n_{\text{down}}^1, n_{\text{down}}^2, \dots, n_{\text{down}}^J\} \end{array} \right. \quad (9)$$

取 N_{up} 的第2个至第 J 个值、 N_{down} 的第1个至第 $(J-1)$ 个值,记作:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{upp}} = \{n_{\text{up}}^2, n_{\text{up}}^3, \dots, n_{\text{up}}^J\} \\ N_{\text{downn}} = \{n_{\text{down}}^1, n_{\text{down}}^2, \dots, n_{\text{down}}^{J-1}\} \end{array} \right. \quad (10)$$

设置计数初值 $\text{Cnt}=0$.对 N_{upp} 、 N_{downn} 逐点做差并取绝对值 $|\Delta N_{\text{ud}}|$,若 $|\Delta N_{\text{ud}}|$ 小于频点切换时隙阈值 η (或其若干倍),则计数 Cnt 加1.当 Cnt 超过累积阈值 χ 时,确认突发,即 n_{up}^1 为FH/TH信号的突发时刻;后续依此规则,直至最后不超过 η 的 $|\Delta N_{\text{ud}}|$,其下降沿时刻 n_{down}^j 即为本次FH/TH信号的结束时刻.

以上排序和突发检测流程,严格遵循FH/TH信号相邻两跳的衔接特征.时差绝对值小于切换时隙阈值 η ,才确认衔接;连续相邻两跳确认衔接总次数大于累积阈值 χ ,才确认信号突发.该方法步骤严谨,可有效降低虚警率和漏警率.分析可知,本文所定义的IAC是准确检测突发时刻和结束时刻的核心关键.该方法不仅适用于FH/TH信号检测,也适用于其它FH信号检测,且可应用在FH/TH信号时差定位等领域.

3 仿真实验

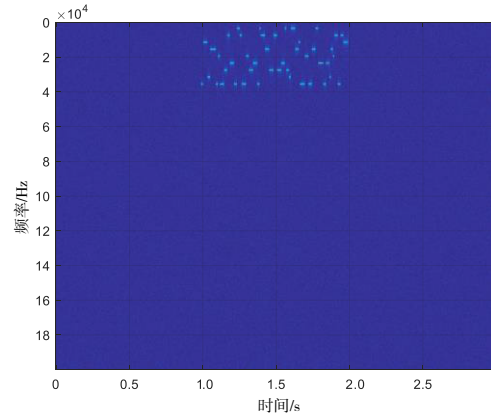
3.1 强雷达脉冲干扰下有效性验证

为仿真分析算法的有效性,设置信号时长3.0 s,采样频率200 kHz,信号包含二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制的FH/TH信号、高斯噪声以及雷达脉冲(以线性调频脉冲为例).BPSK符号速率 $\text{Bot}=1$ kbps, FH/TH从1.0 s开始突发,在2.0 s结束,相邻两跳切换时隙0 s;雷达脉冲全时段周期猝发,重复周期1 ms,脉冲宽度10 μs ,线性调频系数 7.2×10^6 kHz/s,载波频率20 kHz.其余参数如表1所示.

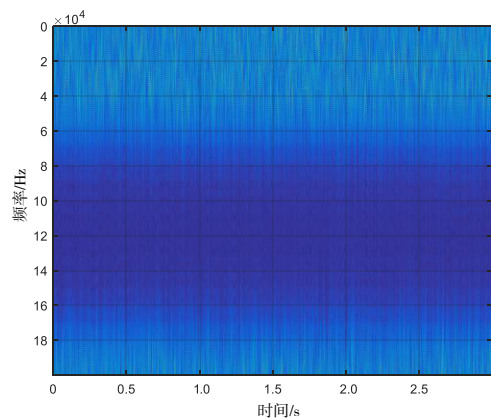
表1 仿真参数设置

参数名称	仿真取值
跳频频率集	{4,8,12,16,20,24,28,32,36} kHz
跳频驻留时长集	{9,14,19,24,29} ms
SJR	-20 dB
SNR	0 dB

利用短时傅里叶变换^[17],计算得到图2所示仿真信号的时频图.



(a) 0 dB 高斯噪声干扰背景



(b) 0 dB 高斯噪声与 20 dB 雷达干扰背景

图2 不同背景下仿真信号的时频图

在图2(a)中的0 dB高斯噪声干扰背景下,可观察到(1.0 s, 2.0 s)区间的FH/TH信号频谱;图2(b)中0 dB高斯噪声与20 dB主动雷达脉冲干扰背景下,在时频图中观察不到频谱跳变,主动雷达脉冲干扰掩盖了FH/TH信号的时频特性,基于图像处理の時频分析检测方法难以满足FH/TH信号的检测需要.

进一步,对比能量检测、多跳自相关与本文方法的性能. 任选一子信道,以 $f_c=4$ kHz为例,计算滑动窗能量、多跳自相关和间隔自相关,结果如图3所示. 其中,图3(a)是0 dB高斯噪声背景下的信号时域波形、滑动能量、多跳自相关系数和间隔自相关结果,图3(b)是0 dB高斯噪声和20 dB雷达脉冲干扰背景下的时域信号波形及对应的检测测量结果.

由仿真结果可见,在能量检测方法中,滑动窗能量曲线仅在高斯噪声背景下表现为窗函数形式,而在强雷达

脉冲干扰背景下对比度下降,几乎消失,且能量曲线动态范围大,不利于检测阈值设置. 在多跳自相关方法中,从突发时刻1.0 s起计算多跳自相关,高斯噪声背景下,多跳自相关曲线左侧出现衰减振荡,但衰减振荡时长约为1 ms,远小于最小跳周期(9 ms),原因在于FH/TH信号无恒定跳速,多跳自相关方法不能适用;在强雷达脉冲干扰下,多跳自相关曲线无振荡,亦表明不适用于FH/TH信号检测. 与以上两种方法相比,在FH/TH信号突发位置,两种情形中IAC均呈现为高对比度的窗函数形式,且取值稳定在[0,1]内,于上升沿/下降沿检测十分有利.

通过以上对比结果,验证了本文方法在强雷达脉冲干扰下对FH/TH通信信号检测的有效性. 进一步计算在0 dB高斯噪声和20 dB雷达脉冲干扰背景下,全部子信道上的FH/TH信号分量及接收信号各子信道IAC值,如图4所示.

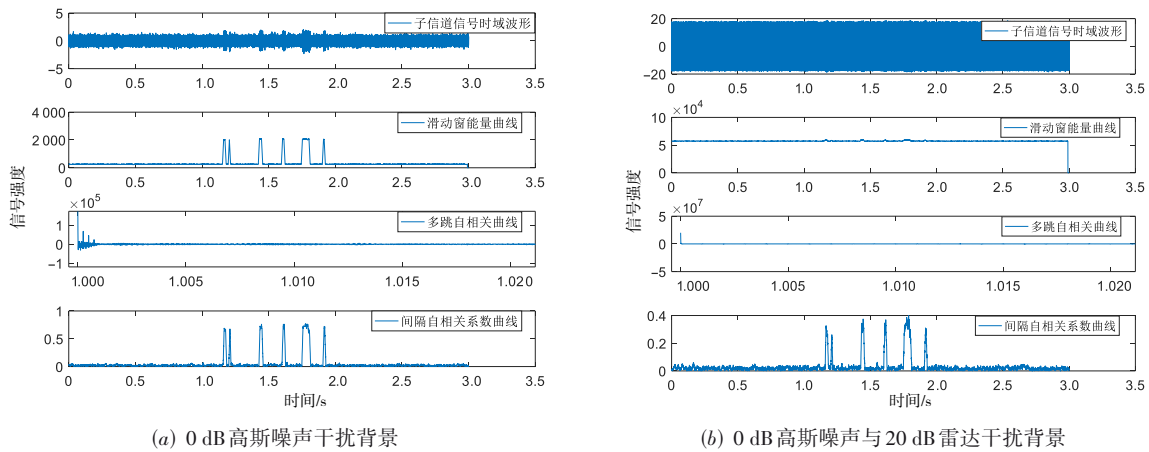


图3 4 kHz子信道波形及三类方法检测测量曲线

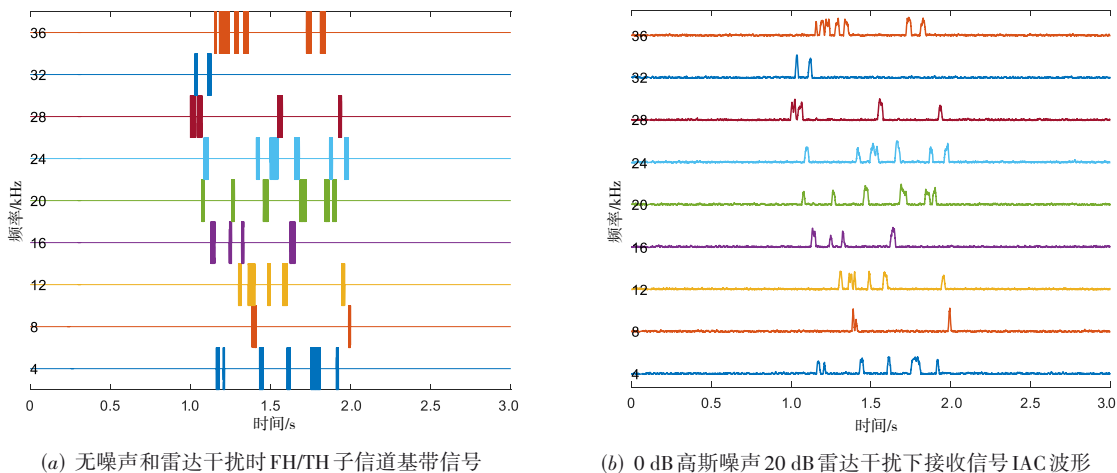


图4 FH/TH子信道分量与接收信号子信道IAC波形

在各子信道的突发位置,IAC均呈现清晰的单位窗函数形式,对应式(3)中的单位窗函数 $g_{m,k}(n)$. 基于

2.4节描述的步骤,检测每跳突发时刻和结束时刻,选定合适阈值 λ ,即可恢复 $g_{m,k}(n)$.

改变基带信号调制方式,仿真产生正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、16正交幅度调制(16-Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM)和最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)三种典型调制的FH/

TH信号,信道化后的波形如图5所示.进一步,在三种基带调制的FH/TH信号中,仿真增加0 dB高斯噪声和18 dB雷达脉冲干扰,并计算接收信号在各子信道上的IAC值,结果如图6所示.

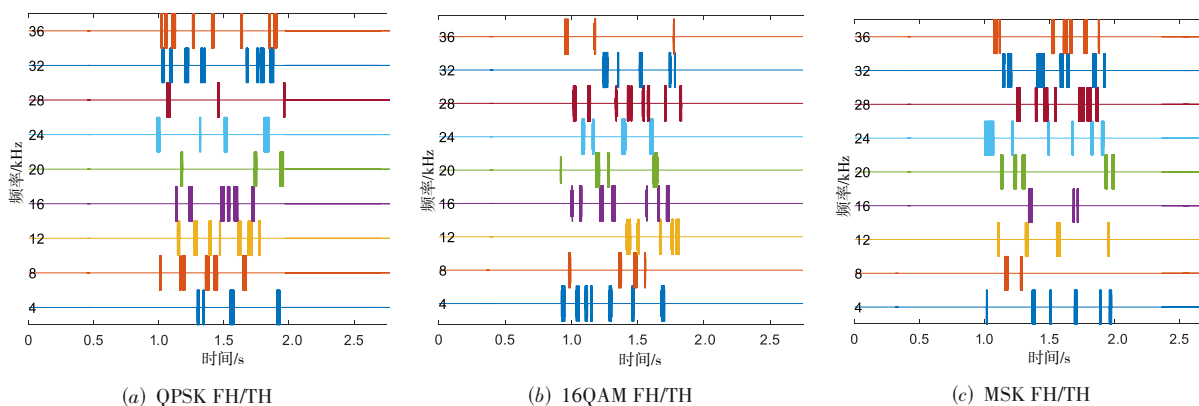


图5 无噪声和雷达干扰时三种调制FH/TH子信道分量

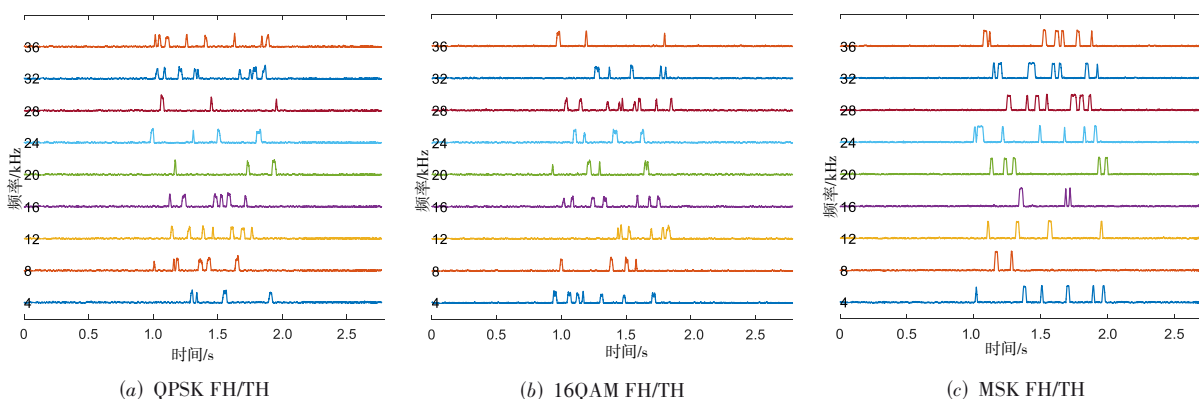


图6 0 dB高斯噪声、18 dB雷达干扰背景下接收子信道IAC波形

各子信道IAC均呈现窗函数形式,表明在强雷达干扰背景下,本文方法对QPSK、QAM和MSK等典型调制的FH/TH信号突发检测均表现出较好的适用性.

3.2 强雷达脉冲干扰下方法检测性能仿真

为了进一步仿真分析检测概率性能,先后设置 $SNR = \{-10, -5, 0, 5\}$ dB,检测阈值 $\lambda = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7\}$,等间隔设置 $SJR = (-45:5:0)$ dB.针对每个SNR、SJR和 λ ,均进行200次蒙特卡罗仿真.仿真过程中,设置切换时隙阈值 $\eta = 1.5$ ms,衔接次数阈值 $\chi = 6$ (即跳频集频率个数的2/3).结果如图7所示.

由仿真结果可见,检测概率与检测阈值 λ 有关.取 $\lambda = 0.3$ 、 $\lambda = 0.5$ 和 $\lambda = 0.7$ 时,SNR和SJR越高,检测概率越高,符合预期;在SNR和SJR较低时,检测概率不理想.取 $\lambda = 0.1$ 时,在低SNR和低SJR条件下检测性能良好,当 $SJR < -20$ dB时检测概率接近1.分析可知,在低SNR和低SJR条件下,FH/TH信号的IAC较小,阈值 λ 越小,漏

警概率越低,则检测概率越高;随着SNR和SJR的提高,检测概率下降,与预期不太符合.原因在于,为降低虚警概率,本文对FH/TH信号的突发检测采用多阈值综合处理方法:上升沿或下降沿检测阈值 λ 、频点切换时隙阈值 η ,以及连续累积阈值 χ .显然,随着SNR和SJR增大,FH/TH信号的IAC逐渐增大,更易满足阈值 λ 的要求,但相邻两跳下降沿与上升沿时差可能增大,超过频点切换时隙阈值 η ,导致漏警,分析示意如图8所示.当FH/TH信号IAC大而阈值 λ 小时,相邻两跳检测下降沿与上升沿相隔大,其时差超过阈值 η 的概率大,漏警概率大,此即图7(a)中检测概率随SNR、SJR增大反而下降的原因.

综合仿真与分析,在不同SNR和SJR条件下,为保证较好的检测概率性能,应采取以下措施:(1)在低SNR、低SJR条件下,使用小的阈值 λ ,例如 $\lambda = 0.1$;(2)在高SNR、高SJR条件下,使用大的检测阈值 λ ,或者

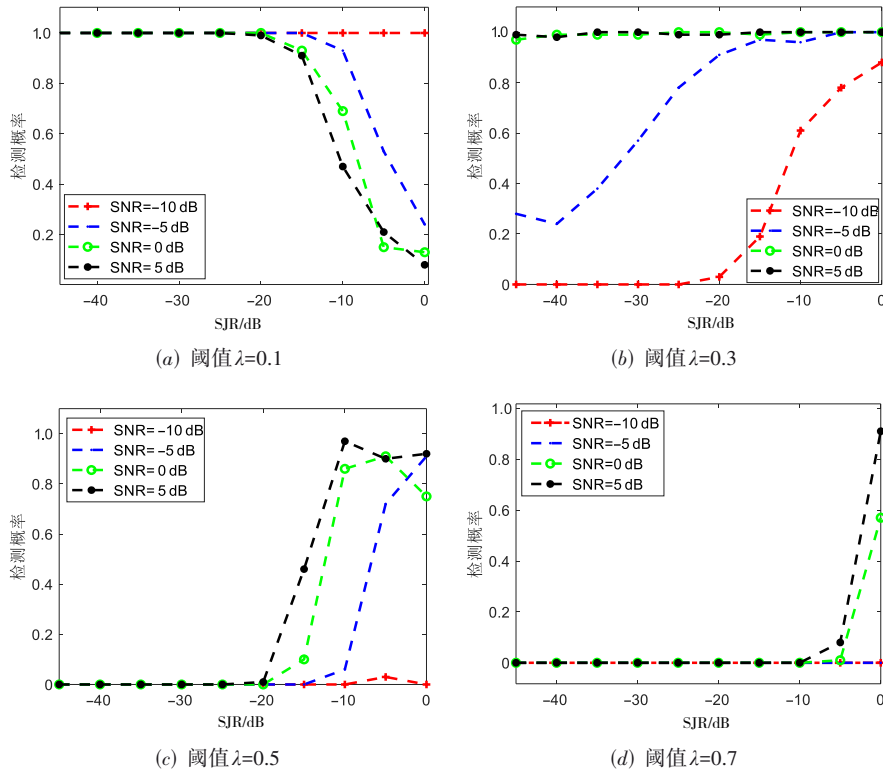


图 7 不同阈值、SNR 和 SJR 条件下检测概率曲线

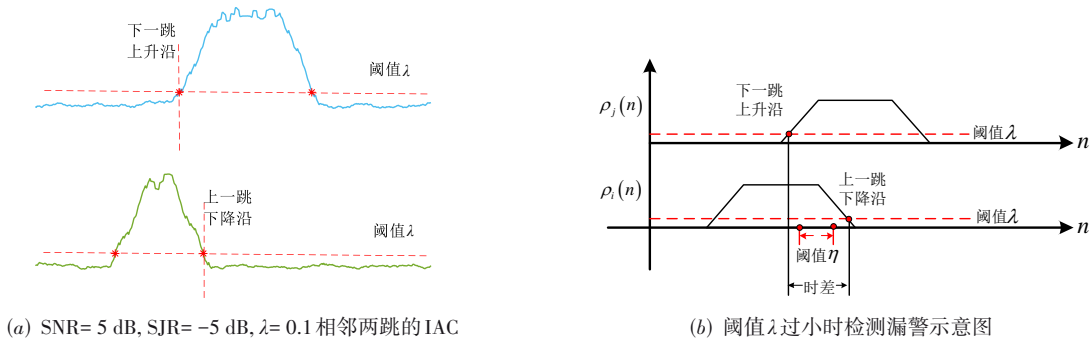


图 8 阈值 λ 过小,相邻两跳下降沿和上升沿时差大于 η 示意图

组合使用小的检测阈值 λ 与大的时隙阈值 η .

4 实验验证

将本文提出基于 IAC 检测方法应用于强主动雷达脉冲干扰的真实电磁环境,对某微弱 FH/TH 通信信号进行检测.以宽带采集设备采集的一组数据为处理样本, SJR 约 -17 dB, SNR 约 -8 dB. 雷达干扰脉冲宽度、重复周期时变,存在 20 余种组合, FH/TH 信号频点数目达 17 个. 在各频点做信道化滤波处理,然后计算 IAC. 按频率大小依次排列,所有 17 个子信道化后的信号波形

和 IAC 波形如图 9 所示.

由图 9(a)可见,频点 1 至频点 9 子信道信号明显受强烈的雷达脉冲干扰,且频点 3 子信道信号受雷达脉冲干扰最为严重(雷达脉冲载波在该频点附近). 受强雷达脉冲干扰影响,无法从时域判定各子信道是否存在突发;根据图 9(b)中计算得到的各子信道 IAC,可清晰观测到前后衔接的单位窗函数形式,即 FH/TH 信号突发位置,结合所提出的多阈值处理方法可实现对 FH/TH 信号的突发检测.

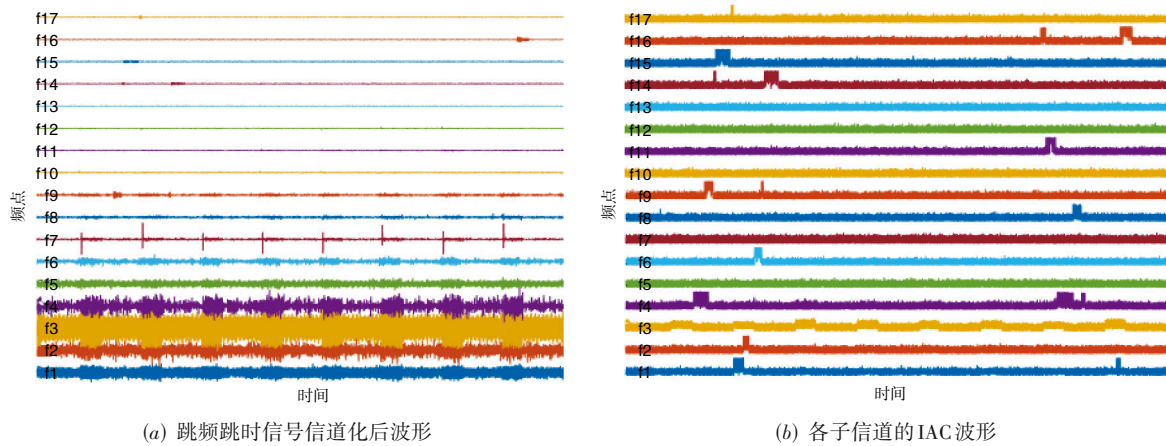


图9 某真实电磁环境FH/TH信号子信道波形和IAC波形

5 结论

针对强雷达脉冲干扰下的跳频跳时通信信号检测问题,本文提出基于间隔自相关系数的检测方法.通过仿真,验证了方法的有效性,使用小阈值或组合使用多阈值,可在不同信噪比和信干比条件下实现良好的检测性能.最后利用实测数据,验证了本方法在真实电磁环境中受强雷达脉冲干扰影响小,能够检测跳频跳时通信信号.

参考文献

- [1] 王巍, 赵继军, 彭力, 等. 基于 UAV 的移动物联网远距离通信节能策略研究[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2914-2922.
WANG W, ZHAO J J, PENG L, et al. Research on the energy saving strategy for long distance communication of mobile internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2914-2922. (in Chinese)
- [2] YE J Q, ZOU J, GAO J, et al. A new frequency hopping signal detection of civil UAV based on improved K-means clustering algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 53190-53204.
- [3] 孟令杰, 张顺健, 翟翔. 战术电台跳频通信反侦察抗干扰效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(6): 76-85.
MENG L J, ZHANG S J, ZHAI X. Analysis of counter-reconnaissance and counter-jamming effectiveness for tactical radio frequency hopping communication[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(6): 76-85. (in Chinese)
- [4] 宁晓燕, 王影, 孙志国, 等. 多音干扰下 Nakagami-m 信道传输 Link16 数据链的性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(2): 566-571.
NING X Y, WANG Y, SUN Z G, et al. Performance analysis of Nakagami-m channel transmission Link16 under multi-tone interference[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(2): 566-571. (in Chinese)
- [5] LIU X, SHU Q, ZENG Q. Low-hit-zone frequency/time hopping sequence sets with large family size[J]. IEEE Access, 2019, 7: 181733-181739.
- [6] 李硕, 李天响. 短波信道下的跳频信号检测[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 623-629.
LI S, LI T Y. Frequency hopping signal detection over the short-wave channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 623-629. (in Chinese)
- [7] 李涛涛. 跳频跳时技术在战术通信中的应用[J]. 无线电工程, 2004, 34(12): 64-65.
LI H T. The application of FH/TH technology in the field of tactical communication[J]. Radio Engineering, 2004, 34(12): 64-65. (in Chinese)
- [8] BEAULIEU N C, HOPKINS W L, MCLANE P J. Interception of frequency-hopped spread-spectrum signals[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(5): 853-870.
- [9] LEHTOMAKI JANNE J. Maximum based detection of slow frequency hopping signal[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 201-203.
- [10] CHUNG C D, POLYDOROS A. Parameter estimation of random FH signals using autocorrelation techniques[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2/3/4): 1097-1106.
- [11] WANG Y Z, LIN Y, CHI X W. A parameter estimation method of frequency hopping signal based on sparse time-frequency method[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2018: 1-5.
- [12] 冯维婷, 梁青, 汪一楠. 一种跳频信号的时频分析和参

- 数估计方法[J]. 西安邮电大学学报, 2021, 26(3): 32-39.
FENG W T, LIANG Q, WANG Y N. A method for time-frequency analysis and parameters estimation of frequency-hopping signal[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2021, 26(3): 32-39. (in Chinese)
- [13] 沈强, 周玉芳, 张灵珠. 基于时频分析的跳频信号检测方法研究[J]. 中国无线电, 2022, 322(6): 106-108.
SHEN Q, ZHOU Y F, ZHANG L Z. Research on frequency hopping signal detection method based on time-frequency analysis[J]. China Radio, 2022, 322(6): 106-108. (in Chinese)
- [14] WANG L Y, ZHAN H W, CHEN S. Joint algorithm for blind estimation of FH signal based on STFT and PWVD [C]//2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 1413-1417.
- [15] ZHU J W, WANG A Q, WU W, et al. Deep-learning-based recovery of frequency-hopping sequences for anti-jamming applications[J]. Electronics, 2023, 12(496): 496.
- [16] 李红光, 郭英, 齐子森, 等. 复杂电磁环境下多跳频信号盲检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 13-19.
LI H G, GUO Y, QI Z S, et al. Blind detection of multi-frequency hopping signals under complex electromagnetic environment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7): 13-19. (in Chinese)
- [17] ZHOU F, FAN F F, CHEN Z H, et al. A joint STFT-HOC detection method for FH data link signals[J]. Measurement, 2021, 177: 109225.

作者简介



赵 慎 男, 1983 年 6 月出生, 河北肃宁人. 2015 年博士毕业于国防科技大学. 现为湖南工商大学副教授. 研究方向: 无线信息感知、时空信息安全.

E-mail: zhaoshen_nudt@163.com



戴卫华 男, 1989 年 4 月出生, 江西上饶人. 2017 年博士毕业于国防科技大学. 现为信息工程大学讲师. 研究方向: 信号检测与分析.

E-mail: 13755027628@163.com