

基于快速折叠算法和时频分析的LPI跳频信号截获

王国华 俞能海

(中国科学技术大学信息处理中心 合肥 230027)

摘要: 该文提出了一种新的低截获概率(LPI)跳频信号的截获方法,该方法基于快速折叠算法和时频分析。在低信噪比环境下,该方法能有效检测跳频信号;通过恰当地选择折叠周期范围和分辨率,能实现对跳频参数如跳频周期、跳变时刻和跳频频率的估计。仿真结果和性能分析表明,该方法能有效截获信噪比为0dB的跳频信号,与自适应门限检测方法相比具有更好的性能。

关键词: 低截获概率信号;跳频信号;平滑伪Wigner-Ville分布;快速折叠算法

中图分类号: TN914.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1569-04

FFA and TFA-Based Interception of LPI Frequency Hopping Signal

Wang Guo-hua Yu Neng-hai

(Information Processing Center, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A FFA and TFA based interception of LPI frequency hopping signal is presented in this paper. the algorithm can detect the frequency hopping signal effectively in low Signal to Noise Ratio (SNR); By selecting the range of the folding period and resolution properly, the parameters of frequency hopping signal such as hop duration, time offset and hop frequency can be estimated. Finally, simulation and performance analysis illustrate that the algorithm can intercept the frequency hopping signal under 0dB, and has better performance than the adaptive threshold detection.

Key words: Low probability intercept signal; Frequency hopping signal; Smoothed pseudo Wigner-Ville distribution; Fast folding algorithm

1 引言

信号的截获是指对通信信号的检测、分析、识别、特征参数提取等一系列处理活动,它包括信号检测以及信号处理两个过程,是实施有效干扰、获取情报信息的前提。跳频信号通过降低发射功率、跳频图案设计、同步掩护设计、跳频组网设计等一系列措施,使其被侦察方检测、分析的概率大大降低,是一种典型的低截获概率(Low Probability Intercept, LPI)信号,因而如何有效地检测和截获跳频信号有着重要意义。对跳频信号的检测和截获可以采用多种方法,如时频分析(Time-Frequency Analysis, TFA)、功率辐射计^[1],小波变换^[2],基于最大似然估计的频率预测^[3]等,其中时频分析是一种分析非平稳信号的有力工具,对信号的时频分析通常可分为线性和非线性两大类。在非线性时频分析中科恩类双线性时频分析的应用最广,它主要包括Wigner-Ville分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)及其衍生类型伪WVD(Pseudo WVD, PWVD)和平滑伪WVD(Smoothed Pseudo WVD, SPWVD)等等。文献[4]提出用WVD估计跳频信号的跳频周期、跳变时刻和跳频频率等参数,但是跳频信

号是频率随时间非线性变化的单分量信号,其WVD会出现严重的相干项干扰,将影响跳频信号参数的正确估计。文献[5]提出用SPWVD代替WVD,然后用自适应门限检测算法检测有效窄脉冲的周期性来估计跳频参数,这种方法可以有效地抑制上述相干项干扰,但是在信噪比较低的情况下,噪声的强度与有效窄脉冲的强度相当甚至更强,这时很难用自适应门限从噪声中检测出有效脉冲,导致估计性能变差。基于此,本文提出联合使用快速折叠算法(Fast Folding Algorithm, FFA)和SPWVD估计跳频参数,主要讨论对跳频周期、跳变时刻参数的估计,该方法适合于低信噪比情况下的LPI跳频信号截获。

2 FFA与SPWVD用于跳频信号分析

2.1 FFA与性能分析

FFA是一种类似于FFT的快速算法,适合于检测强噪声中的窄脉冲信号,它将数据分成大小相同的数据块进行折叠相加操作。如果数据块的大小正好与脉冲的周期(或多个周期)相同的话,那么脉冲信号会因为叠加而增强,就会从背景噪声中显现出来。这样即使脉冲很微弱,甚至被淹没在背景噪声中,使用FFA也能有效检测出脉冲的周期和相位。折叠算法有不同的实现方法,其中应用较多的是标准快速折叠算法^[6]。

2005-12-13 收到, 2006-06-27 改回

国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(60496314) 资助课题

考虑一段长度为 N 的周期为 P 的含有噪声的窄脉冲序列, FFA 首先将数据分成长度相等的 3 个数据块并相加(周期= $N/3$), 再对折叠相加后的数据分成长度相等的两个数据块并相加(周期= $N/6$), 重复同样的过程直到周期数为两个数据样本。然后 FFA 回到源数据, 同样的 FFA 将数据分成长度相等的 3 个数据块并相加, 这时改变折叠数据块的起始点位置使折叠周期等于 $(N-1)/3$, 然后重复以上的步骤, 在上述情况下利用 FFA 搜索的周期和分辨率为

$$\frac{N}{3 \times 2^n} \text{ 至 } \frac{N}{4 \times 2^n}, \text{ 分辨率为 } \frac{1}{3 \times 2^n},$$

$$n = 0, 1, \dots, \log_2(N/3) - 1 \quad (1)$$

$$\frac{N}{4 \times 2^n} \text{ 至 } \frac{N}{5 \times 2^n}, \text{ 分辨率为 } \frac{1}{4 \times 2^n},$$

$$n = 0, 1, \dots, \log_2(N/4) - 1 \quad (2)$$

$$\frac{N}{5 \times 2^n} \text{ 至 } \frac{N}{6 \times 2^n}, \text{ 分辨率为 } \frac{1}{5 \times 2^n},$$

$$n = 0, 1, \dots, \log_2(N/5) - 1 \quad (3)$$

由于折叠操作是对不同的周期完成的, 通常这些加法里面有大量的冗余, 而 FFA 则避免了这些冗余, 对基本折叠周期为 P_0 的直接运算需要 $N[(N/P_0) - 1]$ 次加法操作, 而采用 FFA 只需 $N \log_2(N/P_0)$ 次加法, 当 N 较大时, FFA 可有效地减少所需的运算量。

2.2 SPWVD分布与跳频信号模型

采取时域和频域加窗作平滑的方式包括 PWVD 和 SPWVD 两种^[5, 7]。时域和频域同时加窗的 WVD 称为 SPWVD, 其变换表达式如式(4):

$$W_s^{\text{SP}}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(\tau)s(t-u+\tau/2) \cdot s^*(t-u+\tau/2) \cdot e^{j2\pi f\tau} du d\tau \quad (4)$$

其中 $h(t)$ 和 $g(t)$ 分别是频域和时域平滑窗函数, 满足 $h(0) = G(0) = 1$, $G(f)$ 表示 $g(t)$ 的傅氏变换。当 $g(t) = \delta(t)$ 时, SPWVD 即为 PWVD。

利用 SPWVD 估计跳频信号的参数, 通常是先求出信号的 SPWVD 值沿每一时刻的最大值, 这时由于频率跳变, 会在每个频率跳变时刻出现一个较强的窄脉冲, 通过检测该窄脉冲的周期性即能估计各跳频参数, 定义待分析跳频信号的模型如式(5):

$$s(t) = A \sum_k \text{rect}_{T_h}(t - kT_h - \theta) \exp(j2\pi f_k(t - kT_h - \theta)) + w(t), \quad 0 < t < T \quad (5)$$

其中 T 为观测时间, T_h 为跳频周期, rect_{T_h} 是宽度为 T_h 的矩形窗, f_k 是跳频频率, $w(t)$ 是加性高斯白噪声。

2.3 参数估计算法

设观测到的信号为 $x(n), n = 0, 1, \dots, N-1$, 应用 FFA 的估计算法步骤如下:

对接收到的信号 $x(n)$ 进行时频分析, 得到信号的 SPWVD 值 $W_x^{\text{SP}}(x, k)$ 。

(1) 计算 $W_x^{\text{SP}}(x, k)$ 在每一个时刻 n 的最大值得到 $y(n)$ 。

(2) 设定搜索周期范围和分辨率, 对 $y(n)$ 运用 FFA 得到折叠图, 对每个折叠图求出其信噪比关于折叠周期的函数得到周期谱。

(3) 搜索周期谱的幅度最大值, 其对应的时刻即为离散跳频周期的估计值 \hat{N}_H 。

(4) 搜索按估计的跳频周期对应的折叠图的最小值, 由其对应的时刻可求出跳变时刻的估计值 \hat{n}_α 。

(5) 在求出了各频率转换时刻和跳频周期以后, 可以在每段跳频周期的中间取一分析窗口, 在这一分析窗口内只有一个频率分量存在, 这样就可以利用 FFT 估计出每段信号的归一化跳频频率 $\hat{f}_l, l = 0, 1, \dots, (N_s - 1), N_s$ 为估计的频率个数, 从而得到跳频图案。

3 仿真结果与性能分析

3.1 仿真结果

为了验证上述算法的性能, 在 Matlab6.5 环境下进行了仿真, 由于对高速跳频信号的侦收一般均基于宽带中频接收平台, 因此仿真的跳频信号的带宽为 2.56MHz, 采样频率为 5.12MHz/s, 跳速为 5000H/s, 跳频周期为 0.2ms, 每跳的采样点数为 1024 点。利用 SPWVD 对跳频信号进行时频分析时, 由于数据运算量大, 一次时频分析的数据长度不宜太长, 一般为 1024 采样点, 多次时频分析可以采用多窗口重叠的方式以消除窗口效应^[9]。频域和时域平滑窗选择长度为 128 个采样点的高斯窗函数, 此时在每个频率转换时刻, SPWVD 最大值会出现周期性的窄脉冲, 其底部宽度与频域平滑窗的宽度相等, 而每一跳长度为 1024 采样点。在低信噪比环境下, 对这种窄脉冲信号不适合利用 FFT 分析其周期性, 而利用本文提出的 FFA 算法可以得到较好的效果。

图 1 为 SNR=0dB 时长度为 9984 采样点的跳频信号的 SPWVD 等高线图, 其归一化的 10 个跳频频率分别是 {0.126, 0.236, 0.329, 0.449, 0.210, 0.258, 0.310, 0.149, 0.416, 0.243}, 且可以看出第一个和最后一个跳频周期不是完整的跳频周期。作为比较, 图 2(a) 和图 2(b) 给出了在 SNR=10dB 和 SNR=0dB 时 SPWVD 值在每一个时刻 n 的最大值 $y(n)$ 。由图 2(a) 可以看出, 在信噪比较大时, 在每个频率转换时刻, 可以观察到 SPWVD 的最大值出现的窄脉冲, 并呈现出明显的周期性, 自适应门限检测方法就是通过检测该脉冲的周期和位置估计各跳频参数的。但是在低信噪比条件下干扰脉冲

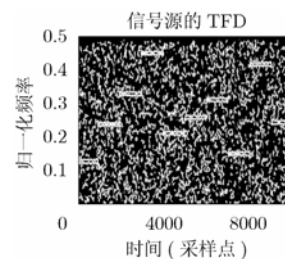


图1 观测信号的SPWVD

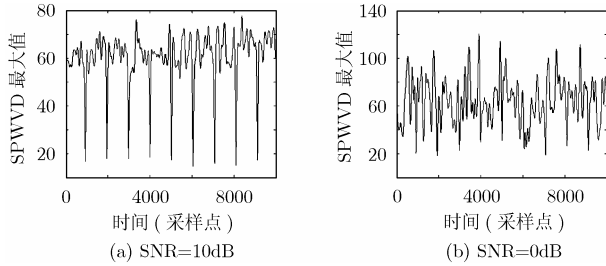


图2 SPWVD沿时间的最大值

与有效脉冲的强度相当甚至更强(如图2(b)),使得利用自适应门限方法难以区分有效脉冲和干扰脉冲,导致检测失败。而利用FFA可以在低信噪比条件下对跳频参数进行估计,对 $y(n)$ 利用FFA进行折叠,折叠的周期范围为400至1120采样点,分辨率为1个采样点,在SNR=0dB时得到的周期谱及时间折叠图分别如图3和图4所示。可以看出,在折叠周期为1024采样点时,该周期谱有一个最大峰值,对应信号的跳频周期为1024采样点,另外由于FFA类似于对信号进行相关处理,基于此可求出跳频信号的跳变时刻。由折叠周期为1024采样点的折叠图4中脉冲最小值的位置,我们可以求出跳频信号的跳变时刻为896采样点。

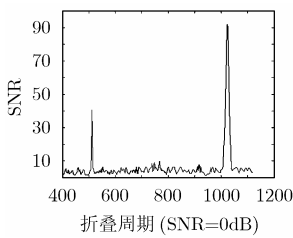


图3 SPWVD最大值的周期谱图

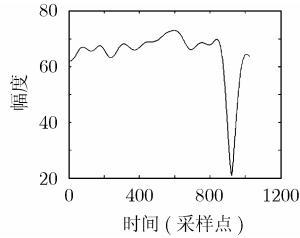


图4 折叠周期为1024点时的折叠图

3.2 性能分析

为了验证本文提出的算法的有效性,在上一节给出的仿真条件和参数下,分别利用自适应门限检测算法和本文提出的 FFA 算法进行仿真。其中自适应门限检测算法的虚警概率分别取 0.005 和 0.001。为了使仿真算法独立于具体的跳频频率,在不同的信噪比下,取不同的跳频频率进行 200 次独立实验并求出其均值,求得跳频周期和跳变时刻估计值的平均方差曲线分别如图 5 和图 6 所示。对图 5 仿真数据进行分析可知:随着信噪比的下降,自适应门限检测的性能也随之降低,另外其性能还与选择的虚警概率有关,在一定的虚警概率下,当信噪比小于某特定值时,会出现由于检测不到脉冲导致检测失败的情况(如图 5 中,当虚警概率等于 0.001,信噪比小于 0dB 时和虚警概率等于 0.005,信噪比小于 -2dB 时),随着虚警概率的增大,虽然能检测到更低信噪比的信号,但是跳频周期估计方差也随之增大。在本文的仿真条件下,当信噪比大于 3dB 时利用自适应门限检测算法才能得到较小的跳频周期估计方差(小于 10^{-6}ms^2)。而利用 FFA 进行跳频参数的估计时,不会出现检测失败的情况,且其检测性能受信噪比影响相对较小,虽然其检测性能随着信噪比的下降

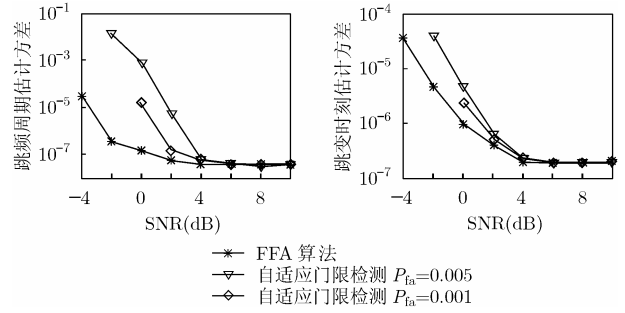


图 5 跳频周期的估计方差

图 6 跳变时刻的估计方差

而降低,但是在信噪比等于 -3dB 时,仍能得到较小的跳频周期估计方差(小于 10^{-6}ms^2)。对图 6 跳变时刻的检测性能进行分析可知:随着信噪比的下降,两种算法的性能也随之降低,但在信噪比小于 -3dB 的情况下,FFA 算法仍然具有较好的效果(小于 10^{-5}ms^2),而自适应门限检测算法则会失效。

通过 2.1 节对 FFA 算法及其复杂性的分析可知,利用 FFA 必须能够将数据块分割成正确的大小,在不知道跳频信号的周期的情况下,需要尝试不同的周期频率,而这样会增加算法的复杂性。但是和 FFT 不同的是,FFA 可以自由地选择折叠周期范围和分辨率以减少运算量。在不知道跳频周期的情况下,可以先减小分辨率进行搜索,在得到跳频周期的大致估计后,再提高分辨率和减小折叠范围就可以得到跳频参数比较精确的估计,利用这种方法可以有效地减小运算量。另外,通过对 SPWVD 最大值的等高线图进行处理,如采用 Canny 边缘检测算法,通过设置适当的 thresh 阈值,也可以克服噪声的影响得到跳频图案的轮廓,通过进一步的处理可以得到跳频周期的大致估计,然后再利用 FFA 算法进行跳频参数的估计可以有效地提高该检测算法的有效性。

4 结束语

与采用自适应门限检测的 SPWVD 估计方法相比,在已知跳频周期的前提下采用 FFA,不仅能有效检测出低截获概率跳频信号,而且同时可以得到跳变时刻的估计,并具有很好的抗噪声性能。对于未知跳速的跳频信号,如果可以预先知道跳频周期的大概范围,通过恰当选择跳频周期的搜索范围和分辨率,可以有效减小运算量和提高运算效率。通过仿真分析表明,本文提出的跳频信号检测与参数估计方法在低信噪比情况下具有很好的性能,因此在低截获概率信号检测与参数估计方面具有一定的应用意义和前景。

参考文献

[1] Lehtomaki J, Juntti M, and Saarnisaari H. Detection of frequency hopping signals with a sweeping channelized radiometer. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2004-11, 2: 2178-2182.

[2] Fargues M P, Overdyk H F, and Hippenstiel R. Wavelet-

- based detection of frequency hopping signals. Conference Record of the Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, California, 1997-11, 1: 515-519.
- [3] Ko C C , Wanjun Zhi and Chin F. ML-based frequency estimation and synchronization of frequency hopping signals. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(2): 403-410.
- [4] Barbarossa S and Scaglione A. Parameter estimation of spread spectrum frequency hopping signals using time frequency distributions. First IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing advances in Wireless Communications, Paris, 1997: 213-216.
- [5] 张朝阳, 曹千芊, 陈文正. 多跳频信号的盲分离与参数估计. *浙江大学学报*, 2005, 39(4): 465-470.
Zhang Chao-yang, Cao Qian-qian, and Chen Wen-zheng. Blind separation and parameter estimation of multiple frequency-hopping signals. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(4): 465-470.
- [6] Staelin D H. Fast folding algorithm for detection of periodic pulse trains. *Proc. IEEE*, 1969, 75: 724-725.
- [7] 科恩 L 著, 白居易译. 时-频分析: 理论与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 109-110.
- [8] 李玉生, 赖仪一, 姚富强. 关于跳频通信 LPI 特性的讨论. 2003 全军通信抗干扰会议论文集, 合肥, 2003: B170-175.
- 王国华: 男, 1977 年生, 硕士生, 研究方向为扩频通信、软件无线电等.
- 俞能海: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为宽带网络与多媒体通信、图像处理与模式识别.