

文章编号: 1001-2486(2007)05-0085-04

一种快速有效的循环平稳信号检测方法*

王满喜^{1,2}, 李宏¹, 马刘非², 陶业荣¹

(1. 63880 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 中国人民解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: TSAE-Z 算法把时间切片自相关包络检测和可变步进的 Zoom-FFT 检测相结合, 实现了对循环平稳信号的快速、精确检测, 仿真结果表明, 在相同数据长度条件下, TSAE-Z 算法能够使检测运算时间减少 3 个数量级; 在相同执行时间的条件下, TSAE-Z 算法能在提高检测分辨率的同时使检测性能提升 6dB 以上。

关键词: 循环平稳; 联合检测; 时间切片; Zoom-FFT

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** B

A Rapid and Effective Detection Method for Cycle stationary Signals

WANG Man-xi^{1,2}, LI Hong¹, MA Yi-fei², TAO Ye-rong¹

(1. Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China;

2. Institute of Communication Engineering, PLA Science and Technology Univ., Nanjing 210007, China)

Abstract: TSAE-Z algorithm combines time slice autocorrelation envelope detection with step-variable Zoom-FFT detection (TSAE-Z), and achieves rapid and precise detection of cycle stationary signals. Results of simulation shows that, on condition of the same length of data, TSAE-Z algorithm is able to significantly decrease implementing time of detection by thousand grade, and on condition of the same implementing time, TSAE-Z algorithm can get 6dB improvement at least on detection performance as well as on detection resolution.

Key words: cycle stationary; joint detection; time slice; Zoom-FFT

循环平稳信号广泛存在于通信、遥测、雷达和声呐系统中, W. A. Gardner 对循环平稳信号进行了系统的分析与研究, 并指出信号的循环平稳特性分析在信号检测和估计方面较传统的方法具有明显的优势^[1]。但是, 传统的循环谱分析方法存在运算量大、计算复杂和数据存储容量大等缺点, 给硬件实现带来难度。文献[2]虽提出了搜索有效性的 ACA(Autocorrelated Cyclic Autocorrelation)算法, 但没有给出 ACA 算法的具体实现和后续的细节检测方法。针对上述问题, 本文提出了时间切片自相关包络检测和可变步进 Zoom-FFT 检测相结合的 TSAE-Z(Time Slice Autocorrelation Envelope and Zoom-FFT Detection)算法, 并与 ACA 算法及传统的 CA(Time-variant Finite-average Cyclic Autocorrelation)算法进行了比较分析, 结果表明 TSAE-Z 算法在快速运算、检测性能和精细分辨率方面都有很大的优势。

1 CA、ACA 循环平稳信号检测算法^[2-3]

设 $x(t)$ 是一个复值的循环平稳信号, 在实际信号检测计算中, 它的循环自相关函数可用有限时间内的估计值来代替理论值来检测信号, 这就是传统基于时变有限平均循环自相关(CA)函数的检测方法, 其算法定义为

$$R_x^\alpha(t, \tau)_{\Delta t} \triangleq \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} x(u + \tau/2) x^*(u - \tau/2) e^{-j2\pi\alpha u} du, \quad |\tau| \leq \Delta t \quad (1)$$

由上式得到的循环频率分辨率 $\Delta\alpha$ 由整个积分时间 Δt 决定: $\Delta\alpha \approx 1/\Delta t$, 检测中为了不遗漏细节信息, 要尽量采用长时间 Δt 来获得较高的分辨率。

* 收稿日期: 2006-10-31

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 王满喜(1979-), 男, 博士生。

文献[2]中提出的 ACA 检测算法选择一适宜时间窗口来对总时间 Δt 沿时间线滑动分段, 分段长度 T 满足 $\Delta t + T \approx \Delta t$ ($\Delta t \gg T$), 在分段内计算 CA 函数后在总时间 Δt 内做自相关得到自相关循环自相关 (ACA) 函数:

$$R_R(\tau, \alpha; z, U)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{z-\Delta t/2}^{z+\Delta t/2} R_x^\alpha(t-U, \tau) {}_T R_x^\alpha(t, \tau)^* dt \quad (2)$$

其中, $R_x^\alpha(t, \tau) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(v) x^*(v-\tau) e^{-i2\pi\alpha v} dv$ ($|\tau| \leq T$), 是每个分段内计算得到的 CA 函数, U 是自相关函数的延时时间, z 是分段的段落标号, 采用式(2)可以快速搜索并估计循环平稳信号的循环特性, 但即使当 U 一定时, 式(2)中也还有3个变量, 故其必须存储和搜索在一个四维向量空间中, 故算法仍有计算复杂、存储量大的缺陷。

2 TSAE-Z 检测算法及其实现

2.1 算法推导

TSAE-Z 算法采用快速搜索检测和细节分析检测相结合的方法, 首先对接收的信号数据进行采样后分段。假设 $f_s = 1$, 接收时间总长度为 Δt , 分段长度为 T , 分段步进为 L , 如图1所示。接收下来的数据时间标号 t 可表示为 $t = zL + k$ ($z = 0, 1, \dots, Z; k = 1, 2, \dots, T$), 其中, z 是分段标号, $Z = [(\Delta t - T)/L]$, 为分段总数, 函数 $[X]$ 为取整函数。

我们知道式(1)的最高峰值出现在 $\tau = 0$ 平面上, 而平稳噪声仅仅出现在 $\alpha = 0$ 平面^[3], 因此为了消除噪声和简便运算, 可以对式(2)进行改进,

$$R'_R(\alpha; z, U)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{z-\Delta t/2}^{z+\Delta t/2} R'_x^\alpha(t-U, 0) {}_T R'_x^\alpha(t, 0)^* dt \quad (3)$$

其中, $R'_x^\alpha(t, 0)_T$ 是当 $\tau = 0$ 且去除了 $\alpha = 0$ 项的有限平均 CA 函数, 即

$$R'_x^\alpha(t, 0)_T = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(v) x^*(v) e^{-i2\pi\alpha v} dv - \delta(\alpha) \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(v) x^*(v) dv \quad (4)$$

式中 $\delta(\alpha)$ 为冲击函数。把式(3)代入式(4)可得

$$R'_R(\alpha; z, U)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{z=0}^Z R'_x^\alpha[(z+z')L+k-U, 0] {}_T R'_x^\alpha[(z+z')L+k, 0]^* \quad (5)$$

可以看出式(5)的结果是分段标号 z 的函数, 等式右边是在以 z 为起点的长度为总长度 Δt 的时间内的相关, 因此为了确保时间变量 $(z+z')L+k$ 不溢出总时间长度, 可令 z 在此处的取值为 0, 且为了使 $R'_x^\alpha[(z+z')L+k-U, 0]_T$ 有值, U 取值应为 L 的整数倍, 即式(5)可以改进为

$$R'_R(\alpha; U)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{z=0}^Z R'_x^\alpha(zL+k-U, 0) {}_T R'_x^\alpha(zL+k, 0)^* \quad (6)$$

又用 $x(t) x^*(t)$ 的傅立叶级数展开式代入式(4)可推导得到

$$R'_R(\alpha; U) \triangleq \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} [R'_R(\alpha; U)_{\Delta t}] = \sum_{\alpha_n \neq 0} |R_{x_n}^\alpha(0) G(\alpha_n - \alpha)|^2 e^{i2\pi(\alpha - \alpha_n)U} \quad (7)$$

对式(6)取包络, 并综合式(7)可得

$$R'_R(\alpha)_E \triangleq |R'_R(\alpha; U)| = \left| \sum_{\alpha_n \neq 0} |R_{x_n}^\alpha(0) G(\alpha_n - \alpha)|^2 e^{i2\pi(\alpha - \alpha_n)U} \right| = \sum_{\alpha_n \neq 0} |R_{x_n}^\alpha(0) G(\alpha_n - \alpha)|^2 \quad (8)$$

式(8)就是时间切片自相关函数包络(TSAE)粗检测方法, 即当 Δt 取很大时, 可以通过计算式(6)包络的近似估计来检测信号的循环平稳特性。但是, 由于 $R'_x^\alpha(t, 0)_T$ 是分段时间 T 内的有限时间循环自相关函数, 故它的检测分辨率仍为

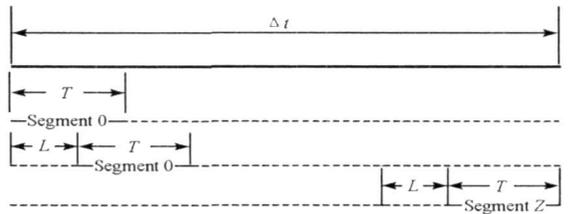


图1 数据分段示意图

Fig.1 Sketch of data subsection

$$\Delta\alpha \approx 1/T \quad (9)$$

为了得到细节部分的循环特性信息并充分利用分段带来的益处,可以采用 Zoom-FFT 算法^[4]对其循环频率进行细化,但经典的 Zoom-FFT 算法的分段基本上都是连续分段的,这样将造成数据量大而性能改善并不多的弊端,因此,这里采用改进的可变步进的 Zoom-FFT 算法,步进即为图 1 中的分段步进 L ,所以可得到 TSAE-Z 算法的最终循环频率分辨率

$$\Delta\alpha' = \frac{1}{T(Z+1)} \approx \frac{L}{T(\Delta t - T)} \approx \frac{L}{T \cdot \Delta t} \quad (10)$$

2.2 算法实现

整个算法可通过以下几个步骤来实现:

(1) 根据掌握的或估计的信息来确定粗检测频点间隔 $\Delta\alpha$ 和最终所欲达到的细检测频点间隔 $\Delta\alpha'$ 。对接收信号进行采样,得到总采样点数为 Δt 的离散信号,确定分段长度 T 和段步进 L 。

(2) 按照图 1 所示把有限总长度 Δt 的信号采样值分为 Z 段,对每段根据式(4)计算时间切片自相关函数 $R_x^{\alpha}(z, 0)_T (z = 0, 1, \dots, Z)$,并存储得到三维序列。

(3) 根据式(6)、(8)计算 $R_R^{\alpha}(\alpha)_E$ 的近似估计值,通过寻找峰值来得到信号循环频率粗检测点 α_d ,然后把步骤(2)中得到的 $R_x^{\alpha}(z, 0)_T$ 三维序列中对应于 α_d 的数据按照时间顺序排列,形成二维序列 $R_x^{\alpha_d}(z, 0)_T$ 并存储。

(4) 对 $R_x^{\alpha_d}(z, 0)_T$ 做 FFT 变化,根据 ZOOM-FFT 算法的原理,此时能够得到我们感兴趣的展现信号循环平稳特性的准确频点位置信息,但是这个位置信息是在粗检测基础上的偏差。

(5) 利用得到的偏差来修正粗检测点 α_d ,即可得到高精度的循环频率细检测点 α 。

3 算法仿真及分析

为了检验算法的性能,我们通过 Matlab 软件来编程实现对算法的仿真。仿真中采用的循环平稳信号是 BPSK 信号,其基带信号采用 $\alpha = 1$ 的双极性升余弦脉冲信号,PN 码是周期长度为 32 的 m 序列,信息比特速率为 $F_b = 1$,PN 码速率 $F_{PN} = 32F_b$,系统采样速率 $F_s = 1024F_b$,载波频率 F_c ,采样总时间 $t = 8F_b$,即信号采样值总数 $\Delta t = 8192$;仿真平台配置为:CPU Pentium[®] 4, 2.40GHz, RAM 512MB, Windows XP, Matlab 7. 0. 1. 24704(R14) Service Pack1。

首先,比较验证 CA、ACA 和 TSAE 算法的执行时间性能,如表 1 所示。从表中很容易看出,在相同数据长度

的条件下,TSAE 算法在执行时间上比其他两种算法都优秀,相比其他两种算法,它的优势在 3 个数量级以上,这对于对实时性要求特别严格的无线电侦察信号处理单元将非常有利。同时,从表中还可以看出,TSAE-Z 算法的执行时间 t_{im} 和参数 T 、 L 有关: T 越大, t_{im} 越小; L 越大, t_{im} 越小,且 t_{im} 随 T 的增加系数要大于 t_{im} 随 L 的减小系数。

接下来分析 TSAE-Z 算法的检测有效性,为了比较算法的检测性能和计算精度,以对 BPSK 信号的载波频率的估计为例来说明。图 2 中分别是在信噪比为 5dB 时得到的 T 长度分段循环自相关函数的

表 1 算法执行时间

Tab. 1 Implementing time of algorithms

算法	数据长度 Δt	分段 T	步进 L	执行时间 t_{im}
CA	2048	/	/	3h 2min 18s
ACA	2048	64	/	5h 9s
		128	/	大于 8h
TSAE	2048	64	32	6. 813000s
			64	3. 29700s
		128	32	1. 625000s
			64	24. 484000s
	8192	128	64	12. 766000s
			128	6. 578000s
		64	32	26. 735000s
			64	12. 985000s
128	64	6. 437000s		
	128	32	100. 875000s	
128	64	64	50. 578000s	
	128	128	25. 500000s	

包络 $|R_x^{\prime a}(z=1, 0)_T|$ 曲线, 时间切片自相关包络 $R'_R(\alpha)$ 曲线和细检测中的 Zoon+FFT 偏差检测函数 $|R_{Zoon}(\alpha')|$ 曲线, 其中, $T=L=U=128$, 三幅图分别对应于 2.2 节算法实现步骤(2)、(3)、(4)的计算结果。

图 2 中, 分段循环自相关函数包络曲线的两个峰值位置即是 BPSK 信号在 $\alpha = \pm 2F_c$ 处的峰值^[3]; 在时间切片自相关函数包络曲线中, 噪声被有效抑制, 两个峰值得到加强, 此时通过检测峰值的方法^[5]可以得到峰值的位置 α_i 和粗检测信号载频结果 F_{cc} ; 在偏差检测函数曲线中, 由于细检测的频域范围为粗检测时的分辨率, 所以其横坐标应为图 2 所示的循环频率 α' (采样频率 $F_s \times$ 分段长度 T), 曲线中的峰值偏离零点的距离即是粗检测时由于分辨率过大而带来的偏差, 利用这个偏差来修正 F_{cc} 就能够得到细检测信号载频结果 F_f 。

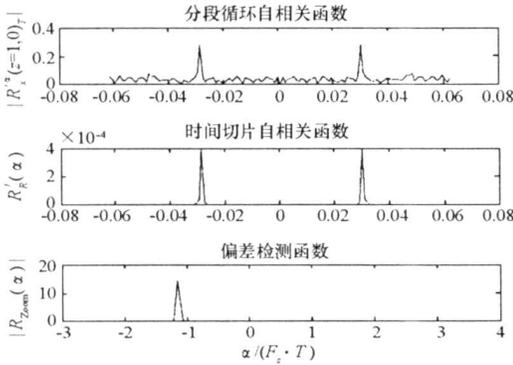


图 2 载频估计示意图
Fig. 2 Sketch of estimation of carrier

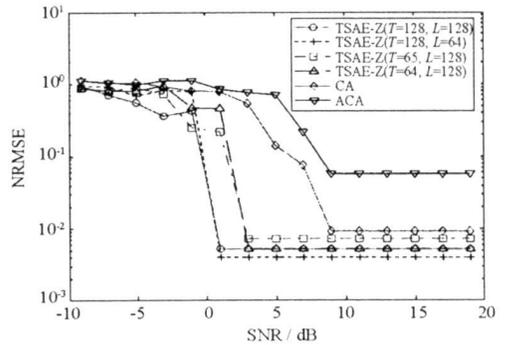


图 3 载频估计的归一化均方根误差
Fig. 3 NRMSE of estimation of carrier

图 3 是在按照蒙特卡罗仿真方法计算出的载频估计归一化均方根误差(NRMSE), 仿真重复 500 次, 背景噪声为加性高斯白噪声。为了满足执行时间相等的条件, CA 算法仿真数据总时间取 $\Delta t = 64$; ACA 算法仿真数据总时间取 $\Delta t = 64$, 分段 $T = 8$; TSAE-Z 算法仿真数据总长度 $\Delta t = 2048$ 。比较图 3 中 TSAE-Z 算法和 ACA 算法、CA 算法的估计误差曲线可以看出, 在执行时间相同的条件下, 各组参数的 TSAE-Z 算法估计误差均普遍小于 ACA 算法和 CA 算法的估计误差, 这是因为在对信号进行检测时, 采样速率往往很高, 因此得到的采样数据也会很多, 但对于一般的检测算法, 由于受到算法计算速度的限制, 所以不能有效地利用全部的数据, 而 TSAE-Z 算法的计算速度快, 能在相同时间内利用相对其他算法更多的数据, 从而使检测性能得到提升。由图还可看出, TSAE-Z 算法在信噪比为 1dB 和 3dB 时达到了其最小分辨率, 而 ACA 算法和 CA 算法在信噪比为 9dB 时才达到最小分辨率, 这说明 TSAE-Z 算法性能优化在 6dB 以上; 通过曲线达到最小分辨率时的估计误差可知, TSAE 算法的最小分辨率要明显小于 ACA 算法的最小分辨率, 这是因为此时的 ACA 算法中分段长度明显要大于 TSAE-Z 算法分段长度; CA 算法的最小分辨率略大于 $T = 64, L = 128$ 时的 TSAE-Z 算法的最小分辨率, 则是由于此时的 TSAE-Z 算法利用了 Zoon+FFT 算法, 使本来应该和 CA 算法相等的最小分辨率得到了进一步细化。

比较图 3 中各组参数的 TSAE-Z 算法估计误差曲线可以看出, 当信噪比小于 1dB 时, 受噪声的影响, 各组参数下算法估计误差都很大, 相对来讲, 参数 $T = 128$ 时的估计误差要小于 $T = 64$ 时的估计误差; 当信噪比变大时, 参数 $T = 128$ 时的估计误差要早于 $T = 64$ 时 2dB 达到最小分辨率的稳定状态, 且最小分辨率要小于 $T = 64$ 时的最小分辨率, 这说明增加分段长度 T 不仅可以有效降低噪声的影响, 而且还可以提高检测分辨率; 另外, 比较各组参数算法的最小分辨率还可以看出, 其中, 参数 $T = 64, L = 128$ 时的最小分辨率最大, $T = 64, L = 64$ 时和 $T = 128, L = 128$ 时的最小分辨率相等, 而 $T = 128, L = 64$ 时的最小分辨率最小, 这说明了当数据总长度一定时, L/T 的比值将决定检测分辨率的大小, 因此增加分段长度 T 、减小分段步进 L 都将有助于提高检测的分辨率。

5 结束语

本文用目标的初始状态量和机动参数构成充分统计量,将机动目标跟踪误差的 CRLB 求解问题转化为变维参数矢量 CRLB 的计算问题,并通过矩阵理论分析了目标机动对 CRLB 变化所带来的影响,从而为机动目标跟踪算法的性能评估提供了基本的理论依据。对转弯机动的仿真结果表明,有源跟踪条件下的距离估计 CRLB 在机动前后会有明显的变化,导致跟踪性能下降。受可观测性条件的影响,在无源跟踪条件下,由于机动参数的估计精度较高,目标在机动阶段距离和速度估计的 CRLB 未见明显的突变。此外,提高测量数据率也有助于参数估计精度的提高。文中的分析方法同样适合于三维空间中的机动目标跟踪情况。

参考文献:

- [1] Chen Y T, Hu A G C, Plant J B. A Kalman Filter Based Tracking Scheme with Input Estimation [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1979, 15 (3): 237- 244.
- [2] Bar-Shalom Y, Bimival K. Variable Dimension Filter for Maneuvering Target Tracking [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1982, 18 (5): 621- 629.
- [3] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [4] Mazor E, Averbuch A Y, Bar-Shalom Y, et al. Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: A Survey [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1998, 34 (1): 103- 123.
- [5] Ristic B, Anulampalam S. Tracking a Manoeuvring Target Using Angle-only Measurements: Algorithms and Performance [J]. Signal Processing, 2003, 83(6):1223- 1238.
- [6] Duh F B, Lin C T. Tracking a Maneuvering Target Using Neural Fuzzy Network [J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cyberm. B, 2004, 34 (1): 16- 33.
- [7] Li X R, Jilkov P. Survey of Maneuvering Target Tracking—Part I : Dynamic Models [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2003, 39(4): 1333- 1364.
- [8] Becker. A General Approach to TMA Observability from Angle and Frequency Measurements [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1996, 32 (1): 487- 494.
- [9] Key S M. 统计信号处理基础[M]. 罗鹏飞, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [10] 占荣辉, 王玲, 万建伟. 基于方位角和多普勒的机动目标无源定位跟踪可观测条件[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1):54- 58.

(上接第 88 页)

4 结论

文中提出了一种采用快速搜索检测和细节分析检测相结合的检测方法来解决循环平稳信号检测中高复杂度、大运算量和大数据存储等难题的 TSAE-Z 算法。该算法快速简单、稳定可靠,在信噪比不太低的情况下不仅能够得到良好的估计,还可以通过灵活地改变分段长度和步进等参数来适应不同的循环平稳信号检测性能的需求。

参考文献:

- [1] Gardner W A. Signal Interception: A Unifying Theoretical Framework for Feature Detection [J]. IEEE Trans. Communication, 1988, 36(8): 897- 906.
- [2] Yeung G Y, Gardner W A. Search-efficient Methods of Detection of Cyclostationary Signals [J]. IEEE, Trans. Signal Processing, 1996, 44(5): 1214- 1223.
- [3] Gardner W A. Spectral Correlation of Modulated Signals: Part I —Analog Modulation[J]. IEEE Trans. Communication, 1987, 35(6): 584- 594.
- [4] Hoyer E A, Stork R F. The Zoom FFT Using Complex Modulation[C]// IEEE Proceedings of ICASP, 1977: 837- 841.
- [5] 黄春琳, 姜文利, 等. 低截获雷达信号的循环谱相关函数检测方法分析[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4):102- 106.