

基于 ITD 的跳频信号跳速估计算法

安金坤^{1,2}, 田斌^{1,2}, 易克初¹, 于全³, 孙永军¹

(1. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 中电集团第 36 研究所通信系统信息控制技术国防科技重点实验室, 浙江 嘉兴 314001;

3. 中国电子设备系统工程公司研究所, 北京 100039)

摘要: 非合作情况下, 跳频信号参数准确快速的估计对于获取对方通信参数、产生跟踪式干扰等具有重要意义。提出了一种基于固有尺度分解的跳频信号跳速的快速估计算法, 该算法迭代地分解跳频信号成一系列固有旋转分量, 并求出由各层旋转分量信号包络瞬时幅度的最大值所构成的一个分析序列, 对该序列进行傅里叶变换即可估计出跳频信号的跳速。该算法具有运算复杂度低、不受时频不确定性原理影响、时频定位精度高的优点。仿真结果显示, 该算法能够有效地估计出跳频信号的跳速。

关键词: 信号检测; 通信对抗; 固有尺度分解; 跳频信号

中图分类号: TN 971.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.34

Intrinsic time-scale decomposition based algorithm for the hop rate estimation of frequency hopping signal

AN Jin-kun^{1,2}, TIAN Bin^{1,2}, YI Ke-chu¹, YU Quan³, SUN Yong-jun¹

(1. State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Laboratory of Information Control Technology for Communication System,

No. 36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314001, China;

3. Graduate School of China Electronics Equipment System Engineering Corporation, Beijing 100039, China)

Abstract: In non-cooperative condition, it is of significance to estimate the parameters of frequency hopping signals accurately and rapidly for capturing the communication parameters of hostile part and generating track jamming. An intrinsic time-scale decomposition based algorithm for rapidly estimating a frequency hopping hop rate is proposed. In this algorithm the frequency hopping signal is iteratively decomposed into a series of proper rotation components and a new sequence is derived which is composed by the maxima from the instant amplitude envelop of each layer proper rotation component. The Fourier transform based analysis of the obtained sequence provides the estimation of the hop rate for a frequency hopping signal. This algorithm is low in computation complexity, unaffected by time-frequency uncertainty principle, high accuracy in time frequency plan. Simulation results show that this algorithm can estimate the frequency hop rate effectively.

Keywords: signal detection; communication counterwork; intrinsic time-scale decomposition (ITD); frequency hopping signal

0 引言

跳频通信是一种扩展频谱通信体制, 广泛应用于军事通信和民用通信领域, 其载波频率通过受伪随机码序列控制随机地改变, 可以达到低截获性、低检测性、抗干扰, 实现多址通信的目标。在通信对抗中, 为实现有效地跟踪式干扰跳频信号, 必须快速准确地估计出跳频参数, 常见的跳频

信号参数估计算法包括基于信号相关域分析的参数估计算法^[1-3], 基于短时傅里叶域分析的参数估计算法^[4-5], 基于小波域分析的参数估计算法^[6-7]以及基于时频分布的参数估计算法^[8-17]等。相关运算参数估计算法需要大量相关运算, 不利于实时估计出跳频信号的参数, 基于短时傅里叶分析的参数估计算法存在窗宽固定、时频分辨率低等缺点影响估计参数的精度, 基于小波分析的参数估计算法存在小

收稿日期: 2010-01-22; 修回日期: 2010-04-28。

基金项目: 国防科技重点实验室基金(9140C1305010804); 高等学校学科创新引智计划(B08038)资助课题

作者简介: 安金坤(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为通信信号处理。E-mail: ajk8208@163.com

波基预选的难题,基于时频分布的参数估计算法存在时频平面上交叉项对估计精度影响的缺点,各种改进的时频分布虽然能够降低交叉项的影响,但是会造成时频分辨率的降低而影响参数估计精度。并且以上各个时频分析工具的基都是预设的,需要对信号进行积分变换,因此分析时频分辨率受时频不确定性原理的影响,并不适合于非平稳的跳频信号参数的估计。文献[18]提出了一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的跳频持续时间的估计算法,虽然克服了以上传统时频分析工具的固有缺点,但是该算法的 EMD 分解会受端点效应的影响,计算需要大量的筛选过程,计算复杂度,不利于实时计算。

固有时间尺度分解算法是文献[19]于 2006 年提出的一种局域波分析方法^[20],和 EMD 一样,该方法分析着眼于信号的局部,属于局域波理论,适合于分析非平稳信号。本文在文献[18]的基础上,提出了一种利用固有时间尺度分解算法估计跳频信号跳速的算法,该算法运算复杂度低,远低于文献[18],适于实时计算,时频定位精度高,不受时频不确定性原理影响。

1 固有时间尺度分解算法

1.1 算法的基本原理

设有一实信号 $\{X_t, t \geq 0\}$ 为待分解的信号, $\{\tau_k, k=1, 2, \dots\}$ 为 X_t 的波形上局部极值点对应的时刻集合,为了方便分解,定义 $\tau_0=0$ 。一次固有时间尺度分解将信号分解为基线信号 L_t 和固有旋转信号 H_t 。即

$$X_t = Lx_t + (1-L)x_t = L_t + H_t \quad (1)$$

式中, L_t 和 H_t 定义在 $[0, \tau_k]$ 上,而 X_t 定义在 $[0, \tau_{k+2}]$ 上。在连续极值点 $(\tau_k, \tau_{k+1}]$ 区间上定义该区间上 X_t 的基线提取因子 L ,即

$$Lx_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{x_{k+1} - x_k} \right) (x_t - x_k) \quad (2)$$

$$L_{k+1} = \alpha \left[x_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (x_{k+2} - x_k) \right] + (1-\alpha)x_{k+1} \quad (3)$$

式中, α 是分解时的增益控制参数, $0 < \alpha < 1$,文中取为 0.5。这种基线构造方法形成的基线信号 L_t 保留了信号在各个极值点之间的单调性,提取了各个极值点之间叠加的局部高频分量信号,即固有于信号某种尺度上的分量——固有旋转分量。对一次分解后的基线信号当作新的信号重复以上的分解流程,可以得到一系列的固有旋转分量和一个单调趋势信号。过程表示如下

$$\begin{aligned} X_t &= HX_t + LX_t = HX_t + (H+L)LX_t = \\ & (H(1+L) + L^2)X_t = \left(H \sum_{k=0}^{p-1} L^k + L^p \right) X_t \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 瞬时参数的提取

当待分析的信号经固有时间尺度分解(intrinsic time-scale decomposition, ITD)成一系列的固有旋转分量和一个单调趋势分量后,对分解后每一层的固有旋转分量进行单波分析可以得到信号局部的瞬时相位、瞬时频率、瞬时幅度等时频信息。

(1) 瞬时相位

由式(5)或式(6)可得到瞬时相位。式中 A_1 和 A_2 ($A_1 > 0, A_2 > 0$)分别是一个单波(纯正弦波)内两个上过零点 t_1 和 t_5 时刻之间正、负半波的极点幅度,极点时刻分别为 t_2 和 t_4 , t_3 为中间的向下过零点, s_t 是 ITD 分解后的固有旋转分量。

$$\theta_t^1 = \begin{cases} \arcsin \left(\frac{s_t}{A_1} \right), & t \in [t_1, t_2) \\ \pi - \arcsin \left(\frac{s_t}{A_1} \right), & t \in [t_2, t_3) \\ \pi - \arcsin \left(\frac{s_t}{A_2} \right), & t \in [t_3, t_4) \\ 2\pi + \arcsin \left(\frac{s_t}{A_2} \right), & t \in [t_4, t_5) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可简化为

$$\theta_t^2 = \begin{cases} \left(\frac{s_t}{A_1} \right) \frac{\pi}{2}, & t \in [t_1, t_2) \\ \left(\frac{s_t}{A_1} \right) \frac{\pi}{2} + \left(1 - \frac{s_t}{A_1} \right) \pi, & t \in [t_2, t_3) \\ \left(-\frac{s_t}{A_2} \right) \frac{3\pi}{2} + \left(1 + \frac{s_t}{A_2} \right) \pi, & t \in [t_3, t_4) \\ \left(-\frac{s_t}{A_2} \right) \frac{3\pi}{2} + \left(1 + \frac{s_t}{A_2} \right) 2\pi, & t \in [t_4, t_5) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)是对式(5)的简化处理,避免了反正弦计算,在计算机实现上更有效。对式(6)分析,可知在 t_1, t_5 时的相位为 $0, t_2$ 时的相位为 $\pi/2, t_3$ 时的相位为 π, t_4 时的相位为 $3\pi/2$ 。

(2) 瞬时频率

根据得到的瞬时相位,对其微分可得到瞬时频率。

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_t}{dt} \quad (7)$$

(3) 瞬时幅度

瞬时幅度的定义如下

$$A_t^1 = A_t^2 = \begin{cases} A_1, & t \in [t_1, t_3) \\ -A_2, & t \in [t_3, t_5) \end{cases} \quad (8)$$

以上参数都是基于单波分析得到的,由于采用对分解得到的纯正弦波波(即固有旋转分量)进行分析得到各个瞬时参数,所以能够精确表达非平稳信号频率时变的特性,且该变换不是采用传统的积分变换得到瞬时参数信息,故分解得到的时频信息不受时频不确定性原理的制约。

2 跳速估计算法

2.1 基本原理

本文从以下出发点估计跳速:在跳频频率的某个跳频点处,必然会在信号分解的某一层出现相对其他层较大的幅值,该层是包含此刻跳频频率点处的信号成分,考虑到 ITD 分解的滤波特性,改变跳变频率(即跳频)会使该部分的信号可能分解到和上个跳频点相同的层数上,也可能分解到不同的层数上,这取决于此时前后两个载频的频率差大小。若分解到相同的层上,则 ITD 的滤波特性对该层上的所有频点(包括该两个频点)的幅度响应是不同的,因此分解虽然在同一层上,但是取最大幅度时会有所区别。若相邻两个跳频点相距较远分解到两个不同的层上,则两层的幅度也会有所区别。分析以上两种情况可以看出,通过

检测最大幅度值包络的频谱,就可以找到反映最大幅度信号幅度变化的信息,该信息也正是频率跳变的信息。算法中采用 ITD 分解是因为该算法聚焦于信号的局部,基是自适应的,不是积分变换所以不受时频不确定性原理的影响,可以精确地反映出由于载频变化造成的最大幅度变化。而传统的时频分析工具分析时会因信号与预设的基作内积运算而模糊该最大幅度的变化造成参数估计不准。

基于以上的考虑结合文献[18]的思路,并结合 ITD 算法的特点提出了跳速估计算法,步骤如下:

步骤 1 将接收信号 $r(t)$ 进行固有时间尺度分解,得到一定数量的固有旋转分量 $c_n(t)$ 。 n 表示分解的层数编号,分解的层数取决于分解后的该层信号各样点和已分解的各层信号各样点的最大幅度构成的信号是否具有可比性;当再分解的该层信号各样点的幅度和已分解的各层信号各样点幅度最大值构成的信号幅度不具有可比性时停止分解。

$$r(t) = \sum_{n=1}^m c_n(t) + l(t) \quad (9)$$

式中, $l(t)$ 表示接收信号 $r(t)$ 分解 m 次后的余量信号。因为剩余的部分主要是噪声成分,对参数估计没有贡献,所以没有完全分解。

步骤 2 计算每个 $c_n(t)$ 包络的瞬时幅度 $A_n(t)$, 并选择任意时刻上各层 $A_n(t)$ 数值最大的数值,并记该量为 $y(t)$, 即

$$y(t) = \max_n \{ \text{abs}(\text{Hilbert}(c_n(t))) \} \quad (10)$$

步骤 3 计算 $y(t)$ 的傅里叶变换 $Y(f)$ 的幅频响应并求出幅值中除直流外最大幅度值对应的频率, 即

$$f_c = \arg \{ \max_f (\text{abs}(Y(f))) \} \quad (11)$$

步骤 4 若步骤 3 中最大幅度值没有出现明显的线谱, 则通过对 N 段等长的接收信号重复步骤 1~步骤 3, 求出每段信号的 $Y_i(f)$; 并将 N 个信号的 $Y_i(f)$ 求和取幅度再求除直流外最大幅值对应的频率, N 的大小取决于幅频响应是否出现单峰线谱, 即

$$f_c = \arg \left(\max_f \left(\text{abs} \left(\sum_{i=1}^N Y_i(f) \right) \right) \right) \quad (12)$$

以上的峰值谱线对应的就是跳频信号的跳速估计值。

2.2 算法复杂度分析

算法的复杂度是指实现算法时所需的乘法次数和加法次数, 将本文所提算法与文献[18]所提的基于 EMD 算法的复杂度作对比, 假设一次处理的信号长度是 n , 每段信号有 p 个极值点, 为得到一个固有模态函数平均需要筛选 l 次, 每个信号需要分解 k 层才能满足算法要求。假设已知每段插值函数表达式的系数, 根据文献[21], 一次插值需要 $7 \cdot (n-p) + p - 1$ 次加, 需要 $8(n-p) + 10p$ 次乘, 完成一次筛选需要增加 $2n$ 次加。计算 l 次筛选, k 层的固有模态函数需要 $k \cdot l \cdot (7(n-p) + p - 1 + 2n) = k \cdot l \cdot (9n - 6p - 1)$ 次加, 需要 $k \cdot l \cdot (8(n-p) + 10p) = k \cdot l \cdot (8n + 2p)$ 次乘。

对于固有时间尺度分解, 根据式(3)计算 p 个极点的基线分量需要 $6p$ 次乘, 需要 $4p$ 次加, 根据式(4)计算整个基线分量需要 $p+n-p=n$ 次乘, 需要 $2(n-p) + 2p = 2n$ 次加。为得到固有旋转分量需要 n 次加。需要分解 k 层满足要求, 则需要 $k \cdot (n+6p)$ 次乘, 需要 $k \cdot (2n+4p)$ 次加。

可以看到 EMD 算法的乘法次数约是 ITD 算法的 8

倍, 加法次数约是 ITD 算法的 4.5 倍。因此, 固有时间尺度算法的计算量要小于经验模态函数的计算量。

3 仿真结果及分析

本文采用计算机仿真的方法验证以上算法的有效性和可靠性, 仿真模型基于以下的跳频信号模型

$$x(t) = A \sum_k \text{rect}_{T_H}(t - kT_H - \theta) e^{j2\pi f_k(t - kT_H - \theta)} + \omega(t) \quad (13)$$

式中, $\text{rect}_{T_H}(t)$ 是支撑区间在 $(-T_H/2, T_H/2]$ 上, 幅度为 1 的矩形窗函数; A 为信号的幅度; f_k 是某一时刻的跳频频率点; T_H 为一跳持续时间, 其倒数即为要估计的跳速 f_c ; θ 为信道引入的相位旋转量; $\omega(t)$ 为加性高斯白噪声。

仿真参数如下: 采样率 $f_s = 1$ MHz, 符号速率 $T = 10$ kHz, 每个码元内有一跳, 跳速 $f_c = 10$ kHz, 归一化的跳频频率集为 $\{0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2\}$, 一次处理 100 个码元符号, 有 10 000 个抽样点。从理论上来说, 不论多低的信噪比, 只要算法中 N 的取值足够大(即有足够多的数据), 都能够正确地估计出跳速, 但缺点是需要较长的估计时间。因此, 没有给出信号的长度而指出估计信号的方差是没有意义的。对于带内信噪比为 5 dB, 取 $N = 100$, 仿真结果如图 1 所示。图 2 是不同信噪比下以上长度数据估计跳速的正确率, 是每个信噪比下独立运行 100 次的结果。

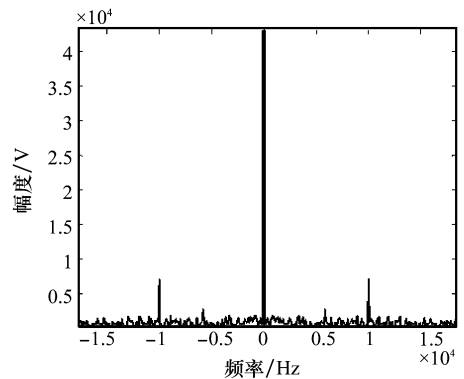


图 1 带内信噪比为 5 dB 时对应的 $\text{abs}(Y(f))$

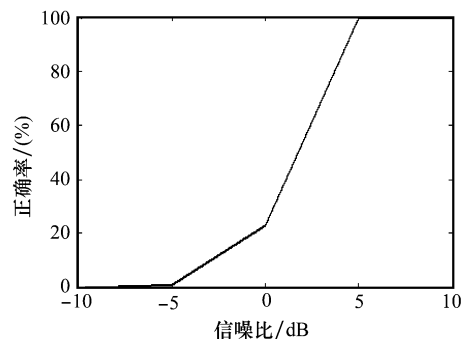


图 2 不同带内信噪比时跳速估计的正确识别率

从图 1 可以看到在频率 $f = 1 \times 10^4$ Hz 处存在除直流外的最大幅度值, 即跳速是 10 kHz。

从图 2 可以看到, 带内信噪比为 -10 dB, -5 dB, 0 dB,

5 dB, 10 dB 下正确识别的概率分别为 0%, 1%, 23%, 100%, 100%, 可知较高信噪比下需要更短的持续时间就能估计出跳频信号的跳速。这是因为叠加信号本身就是一种去噪的过程, 在高信噪比下需要较少的迭加次数就能达到信号参数估计的检测门限。

4 结 论

本文提出了一种基于固有尺度分解的跳频信号跳速估计算法, 该算法克服了传统方法需要基预设, 受时频不确定性原理影响, 存在交叉项的缺点, 同时也克服了基于 EMD 分解算法的端点效应, 需要多次筛选的缺点, 具有运算速度快、自适应分解信号、无须知道跳频信号任何先验信息的优势。

参考文献:

- [1] Polydoros A, Woo K T. LPI detection of frequency-hopping signals using autocorrelation techniques [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1985, 3(5): 714 - 726.
- [2] Chung C D, Polydoros A. Parameter estimation of random FH signals using autocorrelation techniques [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1995, 43(2): 1097 - 1106.
- [3] Fan Haining, Guo Ying, Xu Yaohua. A novel algorithm of blind detection of frequency hopping signals based on second-order cyclostationarity [C] // *Proc. of IEEE Congress on Image and Signal Processing*, 2008: 399 - 402.
- [4] 陈秋华, 王斌. 低信噪比下跳频信号的跳速估计 [J]. *信息工程大学学报*, 2008, 9(4): 397 - 400. (Chen Q H, Wang B. Hop rate estimation of frequency hopped signals under low SNR condition [J]. *Journal of Information Engineering University*, 2008, 9(4): 397 - 400.)
- [5] 郑文秀, 赵国庆, 罗勇江. 跳频信号的跳速估计 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(10): 1500 - 1501. (Zheng W X, Zhao G Q, Luo Y J. Hop rate estimation for frequency hopping signals [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(10): 1500 - 1501.)
- [6] 王明海, 苟彦新, 田岩. 一种基于小波脊时频分析的差分跳频信号检测方法 [J]. *电视技术*, 2008, 48(3): 86 - 90. (Wang M H, Gou Y X, Tian Y. A differential frequency hopping signal detection method based on wavelet transform and time-frequency analysis [J]. *Telecommunication Engineering*, 2008, 48(3): 86 - 90.)
- [7] Fargues M P, Overdyk H F, Hippenstiel R. Wavelet-based detection of frequency hopping signals [C] // *Conference Record of the Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Pacific Grove*, 1997: 515 - 519.
- [8] 雷迎科, 钟子发, 吴彦华. 基于 RSPWVD 高速跳频信号跳速周期估计算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(5): 803 - 805. (Lei Y K, Zhong Z F, Wu Y H. Hop duration estimation algorithm for highspeed frequency-hopping signals based on RSPWVD [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(5): 803 - 805.)
- [9] 武开有, 钟志明, 徐以涛, 等. 基于重排 Gabor 谱方法的跳频信号参数估计 [J]. *电子信息对抗技术*, 2009, 24(3): 11 - 14. (Wu K Y, Zhong Z M, Xu Y T, et al. Parameter estimation of frequency-hopping signals based on reassignment gabor spectrum method [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(3): 11 - 14.)
- [10] 郭艺, 张尔扬, 沈荣骏. 调频信号时-频域分析与参数盲估计算法 [J]. *信号处理*, 2007, 23(2): 210 - 213. (Guo Y, Zhang E Y, Shen R J. The time-frequency analysis and blind parameter estimation of frequency hopping signals [J]. *Signal Processing*, 2007, 23(2): 210 - 213.)
- [11] 卢虎, 史浩山, 谢岩. 估计跳频信号参数的多窗口迭代平滑伪 WVD 新算法 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(2): 52 - 55. (Lu H, Shi H S, Xie Y. The estimation of FH signal parameter by multi-windows iterative SPWVD algorithm [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2008, 9(2): 52 - 55.)
- [12] 郭建涛. 随机跳频信号的模糊函数与时频分析 [J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(18): 121 - 123. (Guo J T. Ambiguity function of random frequency-hopping signals and its time-frequency analysis [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(18): 121 - 123.)
- [13] 苏元伟, 何明浩, 余国文. 基于时频分析的跳频信号参数盲估计方法 [J]. *电子信息对抗技术*, 2009, 24(1): 9 - 12. (Zhang Y W, He M H, Yu G W. Blind parameter estimation of FH signals based on time-frequency analysis [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(1): 9 - 12.)
- [14] Li Nan, Dong Shuang, Yang Dongmei, et al. The research on frequency-hopping signals methods based on adaptive optimal kernel time-frequency representation [C] // *Proc. of International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2009: 544 - 547.
- [15] 范海宁, 郭英. 一种新的跳频信号参数盲估计算法 [J]. *信号处理*, 2009, 25(11): 1754 - 1758. (Fan H N, Guo Y. A novel blind parameter estimation algorithm of frequency-hopping signals [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(11): 1754 - 1758.)
- [16] Lei Yingke, Zhong Zifa, Wu Yanhua. A new hop duration blind estimation algorithm for frequency-hopping signals [C] // *Proc. of IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*, 2008: 695 - 699.
- [17] Fan Haining, Guo Ying, Meng Qingwei. Blind detection and parameter estimation algorithm based on atomic decomposition and information theoretic criterion [C] // *Proc. of IEEE International Conference on Networks Security, Wireless Communication and Trusted Computing*, 2009: 509 - 512.
- [18] Yuan Ye, Mei Wenbo, Wu Siliang, et al. Hop period estimation for frequency hopping signals based on hilbert-huang transform [C] // *Proc. of IEEE Congress on Image and Signal Processing*, 2008: 452 - 455.
- [19] Frei M G, Osorio I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of nonstationary signals [J]. *Proc. of the Royal Society A, Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 2006, 463(2078): 321 - 342.
- [20] 张海勇. 一种新的非平稳信号分析方法—局域波分析 [J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(10): 1327 - 1333. (Zhang H Y. A new method for analysing nonstationary signal local wave analysis [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(10): 1327 - 1333.)
- [21] 许小勇, 钟太勇. 三次样条插值函数的构造与 Matlab 实现 [J]. *兵工自动化*, 2006, 25(11): 76 - 78. (Xu X Y, Zhong T Y. Construction and realization of cubic spline interpolation function [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2006, 25(11): 76 - 78.)