

# 膛内目标有效信号自动提取方法

杨梦玲 苏新彦 王 鉴 姚金杰

中北大学山西省信息探测与处理技术重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 雷达回波信号的有效提取是影响后续膛内多普勒信号处理的关键环节,目前内弹道工程应用中通常采用手动截取,该方法的误差较大、精度较低。针对上述问题,提出了一种雷达回波信号的自动提取方法。首先截掉明显的无用噪声部分,然后根据短时傅里叶变换(STFT)时频分析方法结合多普勒原理求出整段信号的速度,并判断出最大速度点作为有效信号的终点,利用改进的多时窗能量比法判定信号的起点。仿真信号及实际信号的实验结果表明,该方法对有效信号起点与终点提取的平均误差为 $0.1875\ \mu\text{s}$ 。

**关键词** 信号处理;多时窗;多普勒原理;短时傅里叶变换;能量比

**中图分类号** TN247      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.092802

## A Method of Automatic Extraction of Effective Signal of Target in Interior Ballistics

Yang Mengling Su Xinyan Wang Jian Yao Jinjie

Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** The effective extraction of radar echo signal is a key step in the process of Doppler signal processing in interior ballistics. Currently manual interception is usually adopted in the engineering application. The method often causes high error and low precision. Aiming at these problems, an effective method of Doppler signal automatic extraction is proposed. The obvious noise can be intercepted. According to the principle of Doppler, the method uses short-time Fourier transform (STFT) to acquire the velocity of the entire signal. The maximum velocity point is judged as the terminal point for the effective signal. The improved method of multiple-window energy ratio is adopted to determine the starting point. The experimental results through simulated signal and actual signal show that the average error of the method to extract the starting points and terminal points of the effective signal is  $0.1875\ \mu\text{s}$ .

**Key words** signal processing; multiple-window; principle of Doppler; short-time Fourier transform; energy ratio

**OCIS codes** 280.3340; 110.7410; 120.1880

### 1 引言

用激光多普勒雷达获取回波信号时,其中除了目标的回波信息之外还伴有大量的随机噪声和干扰信号,所以如何高精度地提取其中的有效信息是雷达检测的首要任务。目前基于多普勒原理利用雷达对膛内弹丸进行速度测量时<sup>[1]</sup>,为了获取全部的有效信息,采集时间一般较长,有效部分的提取就成为后期信号处理的难点,尤其是与炮口速度相关的起点的准确测量非常重要,直接影响到后期速度的计算精度和应用效率。

自动提取一般只出现在地震波的初至拾取等内容中,通常根据信号特征采用能量特征法、瞬时强度比法、分形维数方法、相关法、数字图像处理法、神经网络算法等。对于膛内运动目标有效信号的提取一般是根据经验采用手动截取,这种仅凭个人感觉提取的信号产生的误差较大,精度较低,难以达到应用要求。尤其是随着越来越复杂的电磁环境的干扰,以及现代日新月异的科技对处理精度提出的高要求,这种手动判

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-05-30; 网络出版日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61171179)

作者简介: 杨梦玲(1988—),女,硕士研究生,主要从事信号与信息处理、微波毫米波技术方面的研究。

E-mail: 1079181946@qq.com

导师简介: 苏新彦(1966—),女,副教授,主要从事雷达信息获取和处理技术、电磁兼容等方面的研究。

E-mail: su\_xy@nuc.edu.cn

断的方法已经无法满足海量数据处理的主观要求。通常情况下,实际数据信噪比低、数据量较大,人工操作不仅费力且速度非常慢,难以满足现场实时处理的技术要求。因此,亟待研究一种能实现高精度自动提取有效信号的方法。

针对以上问题,通过研究雷达回波信号的能量分布特征<sup>[2]</sup>、时频域的处理技术<sup>[3]</sup>等,建立了功能灵活的软件处理平台,实现信号的高精度提取,这对提高腔内测速的精度以及实现工程的自动化、智能化做了进一步的尝试,能够减轻应用人员的负担。

## 2 设计方案

设计方案总体分为三大部分,即明显无用噪声段的截除、短时傅里叶变换(STFT)法求取有效信号的终点以及改进的多时窗能量比法对起点的判定。

### 2.1 明显噪声段的截除

腔内多普勒有效信号一般持续几毫秒,实际操作中真正采集到的信号却是几十毫秒,有大量的缓变噪声信号,如图1所示,有效信号段大概在7.5~12.5 ms之间,其余的信号能够很明确地判定为无用的噪声信号,可以直接截除,这样就大大地减少了处理时的计算量,提高了算法的效率。

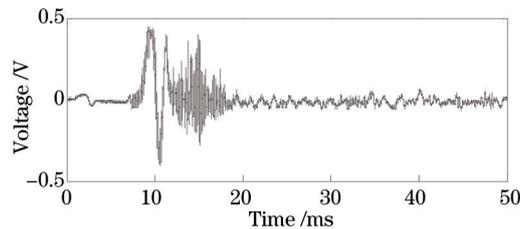


图1 实际获取的多普勒信号

Fig.1 Actual Doppler signal

### 2.2 有效信号终点的判定

由于运动目标在腔内运行的速度越来越大,当目标出腔的一瞬间速度刚好达到最大值,所以可以将运动目标的最大速度点作为判定有效信号终点的依据。

目前常用的多普勒速度计算方法主要有时域、频域、时频域等,频域法计算复杂,时域法则对低频信号处理效果较好,高频处变得不理想,受噪声干扰较大。由于只需准确地判定速度最大值点,对低频处的精度没有太高要求,所以选用对高频处理效果较好的时频域STFT法<sup>[4]</sup>进行最大值点的判定。

STFT在傅里叶变换的基础上引入窗函数思想,对输入信号进行分段加窗处理<sup>[5]</sup>,表达式为

$$\mathcal{F}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)\exp(-j2\pi ft)dt, \quad (1)$$

式中  $w(t)$  为所加的窗函数,  $\tau$  为时间变量,  $f$  为频率变量,  $x(t)$  为原信号,  $t$  为分析时间。利用STFT进行时频分析时,窗函数的选择很重要,选择的窗函数应具有很好的时间和频率聚集性,能够有效地对应信号在时频点附近的内容。这里选择汉宁窗,它具有较小的旁瓣峰值和较大的旁瓣谱峰衰减速度,主瓣稍宽于具有最窄主瓣宽度但同样具有最大旁瓣峰值和最慢衰减速度的矩形窗,进行STFT处理时,能够大大减少频谱泄漏。

具体操作时先对截除后的信号进行小波去噪<sup>[6-7]</sup>,提高最大值点的选取精度,再进行STFT变换,对变换后的时频信号进行谱线插值细化,并搜索出每段窗内的谱峰<sup>[8]</sup>,以此获得信号频率随时间的变化趋势,然后根据多普勒原理完成速度的解算,最后判定速度的最大值点并以此点作为有效信号的终点。具体操作流程如图2所示。

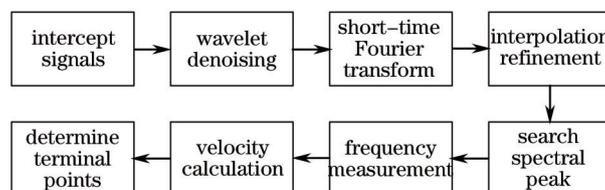


图2 终点判定过程

Fig.2 Diagram of terminal point judgement

### 2.3 有效信号起点的判定

由于目标在腔内运行之前获取的多普勒信号主要是噪声干扰信号,能量相对较弱,而有效信号到达之后,采集到的是噪声和信号的叠加,有效信号起点前后的能量差异很大,因此可以采用能量比法来判定信号的起点。

传统的长短时窗能量比法(STA/LTA)<sup>[9]</sup>用信号短时窗和长时窗的平均能量之比来识别信号到达的时刻,该比值随时间的动态变化能够反映信号的能量分布变化,其表达式为

$$A = \left\{ \frac{\sum_{t=T_0}^{T_2} x^2(t)}{\sum_{t=T_1}^{T_0} x^2(t)} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $A$  为能量比值,  $T_1$  为前时窗起点,  $T_0$  为前时窗终点,也是后时窗的起点,  $T_2$  为后时窗终点。

但是对于信噪比小于 10 dB 的噪声较大的信号,采用传统的能量比法判定精度会相对降低,部分信号起点会判断出错,因此采用改进的多时窗能量比法<sup>[10]</sup>,提高算法的稳定性,降低错误率。

该方法涉及到三个时窗,即前时窗、后时窗和第三时窗,具体分布位置如图 3 所示。

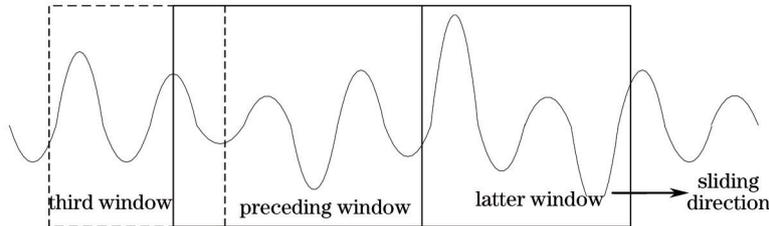


图 3 多时窗示意图

Fig.3 Diagram of multiple-window

计算时先采用传统法计算后前时窗能量比的极大值  $A$ ,并在此极大值对应的时间段前查找次能量比极值,然后在其所处境点处计算后时窗与第三时窗的能量比  $A'$ ,若  $A'$  为  $A$  的 70% 左右,即可认为该点为有效信号的起点,已通过多次测量验证该值,实际操作时可根据不同环境稍作调整。计算表达式为

$$A = \left( \frac{M + \alpha C}{N + \alpha C} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$A' = \left( \frac{M + \alpha C}{D + \alpha C} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $M$ 、 $N$ 、 $D$  分别为后时窗、前时窗和第三时窗内采样点的能量和,  $C$  为所有采样点相对能量的平均值,  $\alpha$  为稳定因子,  $(M + \alpha C)/(N + \alpha C)$  形成了边界加强因子,对非边界有弱化作用,而  $(M + \alpha C)/(D + \alpha C)$  在信号边界处取值特别大,对边界比较敏感,使得  $A'/A$  的取值变化相当明显,在一定程度上减小了起跳不干脆带来的误差,提高了算法的稳定性。具体实现流程如图 4 所示。

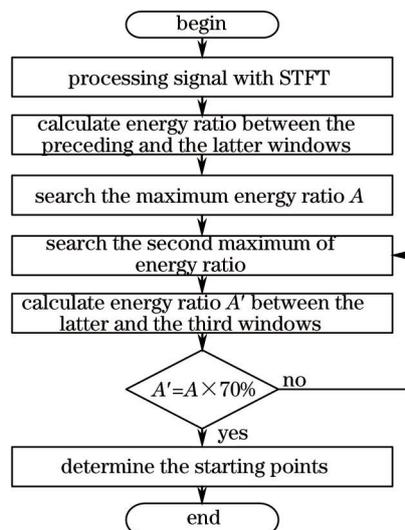


图 4 起点判定流程图

Fig.4 Flow chart of starting point judgement

### 3 实验结果

#### 3.1 模拟信号模型验证

为了对该方法的处理精度进行验证,采用几组多普勒模拟信号进行实验,由于实验中采集到的实际信号信噪比一般为 15~20 dB,高于 10 dB,所以设计多普勒模拟信号时对所有的信号都加入了均值为 0、方差为 1.0、幅值为 4 V 的高斯白噪声,保证有效信号的信噪比都在 10 dB 左右,采样频率都为 20 MHz,每组信号由三段不同类型的信号按顺序相接而成,具体每组信号参数如表 1 所示。

表 1 各组信号具体参数

Table 1 Specific parameters of each signal group

Data	1 <sup>st</sup> section	2 <sup>nd</sup> section	3 <sup>rd</sup> section
1 <sup>st</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Frequency modulation signal
	1 ms	2 ms Am: 15.0 f: 100~30 k	1 ms Am: 15.0 f: 30 k~100
2 <sup>nd</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Sine signal
	1 ms	2 ms Am: 15.0 f: 100~30 k	1 ms Am: 15.0 f: 10 k P: 30°
3 <sup>rd</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Frequency modulation signal
	2 ms	3 ms Am: 15.0 f: 0~100 k	5 ms Am: 10.0 f: 100 k~0
4 <sup>th</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Sine signal
	2 ms	3 ms Am: 15.0 f: 0~100 k	5 ms Am: 10.0 f: 10 k P: 30°
5 <sup>th</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Sine signal
	3 ms	5 ms Am: 10.0 f: 0~1 M	7 ms Am: 15.0 f: 100 k P: 30°
6 <sup>th</sup> signal group	A zero mean line	Frequency modulation signal	Frequency modulation signal
	3 ms	5 ms Am: 10.0 f: 0~1 M	7 ms Am: 15.0 f: 1 M~0

表 1 中 Am 为幅值,单位为 mV, P 为初相位, f 为频率,单位为 Hz。此外,第 3 组到第 6 组的后两段信号加入了周期为 3 ms 的正弦包络,为了防止相位翻转问题的产生,将此正弦信号幅值取绝对值,其表达式为

$$y(t) = |\sin[(2000\pi/3)t]|. \quad (5)$$

上述 6 组信号模拟了不同环境下多普勒信号可能呈现的状态。

对每组信号用上述方法进行处理,结果记录如表 2 和表 3 所示。

表 2 各组信号起点处理结果

Table 2 Processing result of starting point of each signal group

Data	Actual results	Measured results	Deviation	Time for measured results /ms
1 <sup>st</sup> signal group	20000	20002	2	1.00010
2 <sup>nd</sup> signal group	20000	20001	1	1.00005
3 <sup>rd</sup> signal group	40000	39994	6	1.99970
4 <sup>th</sup> signal group	40000	40003	3	2.00015
5 <sup>th</sup> signal group	60000	60002	2	3.00010
6 <sup>th</sup> signal group	60000	59996	4	2.99980

表 3 各组信号终点处理结果

Table 3 Processing result of terminal point of each signal group

Data	Actual results	Measured results	Deviation	Time for measured results /ms
1 <sup>st</sup> signal group	60000	59997	3	2.99985
2 <sup>nd</sup> signal group	60000	60004	4	3.00020
3 <sup>rd</sup> signal group	100000	99996	4	4.99980
4 <sup>th</sup> signal group	100000	99998	2	4.99990
5 <sup>th</sup> signal group	160000	160011	11	8.00055
6 <sup>th</sup> signal group	160000	159997	3	7.99985

其中真实值和测量值都是按采样点记录,偏差为测量值相对于真实值的误差,最后一列是测量值所在的采样点对应的的时间,单位为 ms。

从表2和表3的记录可以看出,使用该方法对不同状态的信号进行处理得到的结果误差都很小,一般是左右三四个点的误差,在时间上相当于左右偏差 $0.20\ \mu\text{s}$ ,其中最大的是对第5组数据起点的判定,误差为11个点,在时间上与实际值相差了 $0.55\ \mu\text{s}$ 。由以上数据处理记录可以判定该方法可以满足工程上的应用要求,精度相对于以往的手动截取得到了很大的提高,在一定程度上减少了工作人员的工作时间。

对各组信号处理得到的效果如图5所示。

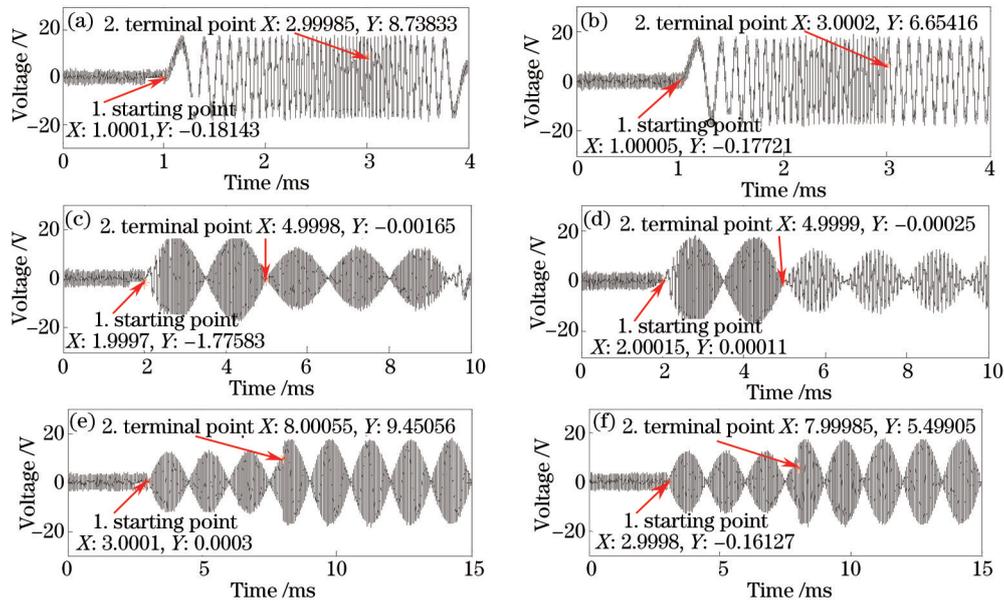


图5 各组信号处理效果图。(a) 第1组信号; (b) 第2组信号; (c) 第3组信号; (d) 第4组信号; (e) 第5组信号; (f) 第6组信号

Fig.5 Processing results of each signal group. (a) 1<sup>st</sup> signal group; (b) 2<sup>nd</sup> signal group; (c) 3<sup>rd</sup> signal group;

(d) 4<sup>th</sup> signal group; (e) 5<sup>th</sup> signal group; (f) 6<sup>th</sup> signal group

观察可知,相对于图1,图5模拟信号模型的信噪比要远远低于实际信号,比实际实验中的条件更加苛刻,但是该方法对每一种状态下的信号处理误差都比较低,能够高精度地判断出有效信号的起始点,具有一定的可行性。

### 3.2 膛内实际信号验证

取几组实际信号验证该方法的适用性,它们是从场地实验中获取的高速运动目标的多普勒信号。实验条件如下:采样频率为20 MHz,雷达频率为95 GHz,采样点数为1 M,膛线深度为2.20 mm,起点位置为0 m,口径为20 mm。

用该方法对各组实际信号进行处理的结果记录如表4所示。

表4 实际信号的处理结果

Table 4 Processing result of actual signal

Data	Starting points /ms	Terminal points /ms	Length of effective signal /ms
1 <sup>st</sup> signal group	7.02920	12.12985	5.10065
2 <sup>nd</sup> signal group	33.4037	38.86085	5.45715

具体处理得到的效果如图6所示。

由图6可以看出,实验中获取的信号大部分是无用的噪声信号,所以操作中手动截掉明显的噪声信号是很有必要的,可以在很大程度上提高算法的效率,减小计算机工作负荷。

观察图6可以发现,实际信号的信噪比相对较高,优于验证实验中给出的模拟信号模型,手动截取只能粗略估计,很难准确地判断信号的起始点,尤其是对于信噪比较低的信号。文中提出的方法对图6各组信号的处理效果十分理想,都能够准确地找到各组信号有效部分的起点和终点,相对于50 ms的总采样长度,实际有效信号只有5 ms,符合目标在膛内运动的规律。实验证明该方法具有一定的实用性,避免了起始点判断误差对信号处理效率的影响,提高了膛内测速的精度。

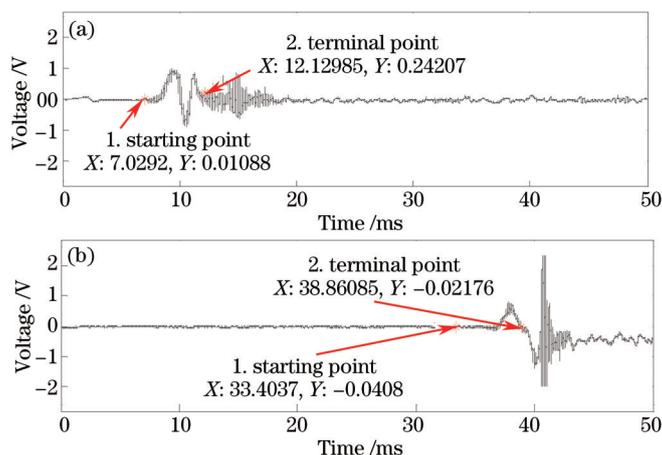


图6 实际信号处理效果图。(a) 第一组实际信号; (b) 第二组实际信号

Fig.6 Processing results of actual signal. (a) 1<sup>st</sup> actual signal group; (b) 2<sup>nd</sup> actual signal group

## 4 结 论

克服了传统手动截取膛内多普勒信号带来的不易操作问题,并在此基础上提出了STFT时频分析法与多普勒原理的结合和改进的多时窗能量比法对有效信号进行自动提取,提高了系统的智能化、自动化。实验证明,该方法能够准确地判定出有效信号的起点和终点,大大地提高了提取的精度和效率,对时间较长且具有明确边界的多普勒信号处理较稳定,为膛内测速提供了很大的帮助,作为一种新的尝试途径,有待深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Kong Wei, Wang Baojun, Zhang Zhiyuan, *et al.*. The processing method of the interior ballistic Doppler signal[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 143-145.  
孔 伟, 王宝军, 张智源, 等. 内弹道多普勒信号处理方法[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(3): 143-145.
- 2 Lü Shichao. Automatic Detection and Location of Microseismic Events[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.  
吕世超. 微地震有效事件识别及震源自动定位方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- 3 Peng Mingjin, Li Zhi. Analysis and feature extraction of laser micro-Doppler signatures based on Hilbert-Huang transforms [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809004.  
彭明金, 李 智. 基于希尔伯特-黄变换的激光微多普勒信号分析与特征提取[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809004.
- 4 Wang Wei, Gu Guohua, He Weiji, *et al.*. Extraction method of photon Doppler velocimetry signal based on MeanShift algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1108006.  
王 玮, 顾国华, 何伟基, 等. 基于 MeanShift 算法的光子多普勒测速信号提取方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108006.
- 5 Yao S, Fang S, Wang X, *et al.*. Parameter estimation for HFM signals using combined STFT and iteratively reweighted least squares linear fitting[J]. Signal Processing, 2014, 99(1): 92-102.
- 6 Yan Shuai, Shang Jianhua, Liu Yuying, *et al.*. Wavelet denoising for heterodyne laser Doppler vibrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 081203.  
燕 帅, 尚建华, 刘玉英, 等. 小波消噪在外差式激光多普勒振动测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 081203.
- 7 Lu Shizeng, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305006.  
路士增, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于小波变换和支持向量多分类机的光纤布拉格光栅低速冲击定位系统[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305006.
- 8 Liu Fan, Jin Shilong, Liu Jun. High accuracy signal processing technology in laser Doppler velocimeter based on mixed programming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s109003.  
刘 帆, 金世龙, 刘 军. 基于混合编程的高精度激光多普勒信号处理技术[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s109003.
- 9 罗 光. 高密点地震信号废道自动识别及初至拾取方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- 10 Xu Yu, Duan Weixing, Xu Weixiu, *et al.*. The improvement of automatic first break picking based on energy ratio[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 595-599.  
徐 钰, 段卫星, 徐维秀, 等. 高精度初至自动拾取综合方法研究[J]. 物探与化探, 2010, 34(5): 595-599.