区域震相初至估计

王海军^{1,2},靳 平²,刘贵忠¹,王晓明²

(1. 西安交通大学电信学院 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所 陕西 西安 710024)

摘要:本文在地震数据自动化处理中,给出一种基于自回归模型的 Akaike information criteria (AIC)算法和信号平均幅值比的混合方法来估计地震信号的初至.用信号的 AIC 曲线和平均幅 值比曲线构造一种叠加曲线,再进行类似于坐标旋转的校正,可以准确估计低信噪比记录中信号 的初至,尤其对于震相类型比较复杂的后续震相(如 S 波、Lg 波)的初至估计结果很好.通过对中 国数字地震台网乌鲁木齐台记录到的 23 次天然地震中 P 波、S 波和 Lg 波的初至估计,与人工分 析结果相比,P 波初至估计的均方误差为 0.71 s,后续震相(S 波、Lg 波)的均方误差为 1.64 s,优 干传统 AIC 算法的估计结果.

关键词 地震波;自动处理;初至;幅值比

中图分类号 19315.61 文献标识码 :A 文章编号 :1000 - 0844(2003)04 - 0298 - 06

0 引言

地震数据自动化处理技术的研究中,信号初至估计是一重要研究课题,初至估计的准确与否直接影响 到震相参数的提取及定位结果的准确性. 地震数据自动化处理中,信号检测与初至估计是不同的两个步 骤,首先由检测算法^[1~5]给定信号初至的初始值,然后根据信号与噪声在振幅、频率、波形或偏振特性等方 面的差异,设计相应的方法来估计信号初至^[36~10].目前,信号初至估计主要采用基于自回归模型(AR 模 型)的 Akaike information criteria(AIC)算法^[38~10],AIC 曲线的极小点对应信号初至. 笔者采用这种方法处 理实际地震数据时发现,当地震信号的初动比较尖锐而且信噪比较高时,该方法可以比较准确地给出信号 的到时,但在信噪比较低或信号初动呈隐伏状时,结果则不太理想. 主要原因在于 AIC 算法估计信号初至 时假设地震记录中的背景噪声和地震信号是平稳的,而实际地震信号是非平稳的,从而造成初至估计的错 误. 针对上述问题,本文提出一种基于 AIC 算法和信号幅值比的混合方法来估计信号初至,其估计性能要 明显优于传统的 AIC 算法.

1 基本原理

1.1 基于 AR 模型的 AIC 算法

AIC 算法的主要步骤是 根据初步检测到的信号 ~~~~~~ 到时为中心截取一段数据作为初至估算窗口(图1), 取数据段的开始一段数据作为噪声模型窗口来建立 噪声 AR 模型,同时取数据段的结尾部分作为信号模 型窗口来建立信号的 AR 模型.在数据段中选择某点



k ,该点将数据段分为噪声窗口和信号窗口,利用噪声 AR 模型参数计算噪声窗口的预测误差序列 e₁,利 用信号 AR 模型参数计算信号窗口的反向预测误差序列 e₂,然后按下式

$$\lambda(k) = (k-1)\log\sigma_1^2 + (N-k+1)\log\sigma_2^2$$
(1)

收稿日期 2003-01-28

基金项目:国防科研预先研究项目(56.1.2)

作者简介 :汪海军(1971 –) ,男(汉族) ,博士生 ,青海西宁人 ,工程师 ,现主要研究方向为地震信号自动处理技术的理论及应用研究.

计算 *k* 点的 AIC 值 $\lambda(k)$. 式中 σ_1^2, σ_2^2 分别是预测误差序列 e_1 和 e_2 的方差 *N* 为数据段中采样点总数 $\lambda < k < N$. 实际计算时对 *k* 进行逐点搜索 理论上 AIC 曲线应在信号真实到时附近具有极小值.

对于信噪比高且初动尖锐的地震信号,这种方 法可以给出非常好的信号初至^[s,10](图2(a)),对于 低信噪比且初动呈隐伏状的地震信号,估计的初至 误差非常大.表现出的问题包括(1)信号初动在 AIC曲线对应的是拐点但不是极小点(图2(b)); (2)AIC曲线既没有极小点,也没有拐点,呈现出比 较复杂的形状(图2(c)).主要原因在于AIC算法估 计信号初至时假设地震记录中的背景噪声和地震信 号是平稳的,而实际地震信号是非平稳的,即使在比 较短的窗口中,截取的地震信号有时也难以满足近 似平稳的假设,从而造成初至估计的错误.

1.2 改进的信号初至估计算法

针对上述问题我们做了以下改进:首先,理想情况下估计信号初至时得到的 AIC 曲线是一个抛物线,曲线的极小点(也是曲线的拐点)对应信号的初至.实际数据分析表明对于信噪比低且初动不明显的信号,AIC 曲线的拐点通常对应着信号的初至,与极小点并不一致.为便于信号初至的自动估计,按下式对 AIC 曲线作校正:

$$d(x'y'L) = \frac{|Ax' + By' + C'|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$
(2)

式中直线 L的方程为 Ax + By + C = 0 A, B 和 C 是直线方程中的系数 <math>M(x', y') 是直线外的一点 M(x', y')L) 是点 M 到直线 <math>L的距离 . 将 AIC 曲线的两端连成 一条直线 则曲线的拐点到该直线的距离相对于其 它点最长 ,用曲线上各点的距离值构成一新的序列 , 新序列对应的曲线经过颠倒使曲线的拐点成为极小 点.

其次,引入一个新的估算初至的特征量,即图1 中被 k 点分开的噪声窗口和信号窗口的平均幅值之 比 u(k)(以下简称幅值比)



图 2 实际地震信号初至估计时 AIC 曲线 的几种常见特征



$$u(k) = \frac{E(+n(t)|)}{E(+n(t)|)} = \frac{(N-k)\sum_{i=1}^{k} + s(i)|}{k\sum_{i=1}^{N} + s(i)|}$$
(3)

式中 E(·)表示均值 x(t)表示噪声窗口中的序列 x(t)表示信号窗口中的序列 xN 为分析数据段中采样 点总数 x(i)表示数据段中第 i 点的采样值.

分析式(3),如果信号初至点的幅值比为 $u(k_0)$,噪声窗口的序列为 $n(t_0)$,信号窗口的序列为 $x(t_0)$, 则

$$k < k_0 \text{ ff } :: E(|x(t)|) < E(|x(t_0)|) :: u(k) > u(k_0)$$
(4)

 $k > k_0$ 时 ;: $E(|n(t)|) > E(|n(t_0)|)$; $u(k) > u(k_0)$

当点 *k* 恰好是信号的初至时,式(3)中的 *n*(*t*)主要是背景噪声 ;*x*(*t*)中主要是地震信号 幅值比 *u*(*k*) 最小 ;理论上幅值比曲线应当在信号真实到时附近具有极小值.由于实际数据处理时幅值比曲线有时也 会存在与 AIC 曲线类似的问题 ,所以幅值比曲线也必须按式(2)做校正.

AIC 值对信号幅频特性的变化非常敏感,而幅值比相对较为稳定.所以实际应用中将校正后的 AIC 曲 线和幅值比曲线进行简单的线性叠加,利用叠加序列来估计信号初至,这样处理即避免了 AIC 值过于敏感的缺点,又吸收了幅值比曲线比较稳定的优点.这种方法我们称之为基于 AIC 算法和信号幅值比的混合初至估计方法.利用这种改进的方法对图 2(b)和图 2(c)中信号的初至重新进行了估计,结果如图 3 所示,效果十分显著.



图 3 改进方法估计的信号初至



2 信号初至估计性能分析

利用改进的方法对中国数字地震台网乌鲁木齐台(WMQ)的地震记录进行了分析,实验数据取自表1 所示的23个事件,表1中事件参数取自中国地震台网(CSN)目录.

WMQ 台的地震记录都为宽频带记录,采样频率为 20 Hz. 分析时首先由自动检测算法给定信号初至 的初始值,信号自动检测使用短时和长时平均法(STA/LTA). 以信号初至的初始值为中心,截取长度 20 s 作为数据段. 在计算 AIC 值时 取数据段的前4 s 建立噪声的 AR 模型;数据段的后4 s 建立信号的 AR 模 型. 对于信噪比低的信号,采用文献 11]给出的最佳频率滤波参数法,根据信噪比自动选择合适的频带对 原始数据做频率滤波. 另外,对于实际的三分量地震记录,P 波的能量通常在垂向分量上最强,而后续波 (如 S 波)的能量在水平分量上比较强. 因此数据自动处理时分析的数据应选择信噪比最大的分量.

图 4 分别是传统的 AIC 算法(图 4(a))、校正的 AIC 算法(图 4(b))、校正的幅值比方法(图 4(c))和 改进的混合方法(图 4(d))对 P 波初至估计与人工分析结果的误差;图 5 分别是传统的 AIC 算法(图 5 (a))、校正的 AIC 算法(图 5(b))、校正的幅值比方法(图 5(c))和改进的混合方法(图 5(d))对后续 S 波、Lg 波初至估计与人工分析结果的误差;图 6 是这几种方法估计出的 P 波初至误差与信噪比的关系;图 7 是这几种方法估计出的 S 波、Lg 波初至误差与信噪比的关系.

分析图 4、5 可见,对于 P 波的初至估计,传统的 AIC 算法的估计误差比较大(图 4(a)),均方误差为 3.89 s 原因在于实验用的许多地震数据的信噪比较低.改进的混合方法的初至估计误差明显减小(图 4 (d)),均方误差为 0.71 s.只用校正的 AIC 方法或校正的幅值比方法估计的初至误差依然比较大,均方误 差分别为 1.36 s 和 1.75 s.对于后续 S 波或 Lg 波的初至估计,传统的 AIC 算法的估计误差非常大,均方误 差为 9.82 s.使用改进的混合方法可以得到比较好的信号初至,估计误差的均方误差为 1.64 s.同样,只使

(5)

用校正的 AIC 方法或校正的幅值比方法估计的初至误差依然比较大 均方误差分别为 5.56 s 和5.19 s.

序号	发震时间	震中距离	震源深度	青切		
	(年天时分)	/度	∕ km	莀级	纬度	经度
1	1998-010 :11 50	10.87	144	4.7 $m_{\rm b}$	38.36°	75.16°
2	1998-030 :10 36	8.95	25	4.3 m _b	39.64°	76.75°
3	1998-035 00 #2	2.09	33	4.3 m _b	43.14°	85.21°
4	1998-038 22 #2	1.39	22	4.4 $m_{\rm b}$	42.58°	86.15°
5	1998-056 01 26	8.29	20	4.3 $M_{\rm L}$	40.45°	77.55°
6	1998-059 08 00	10.08	25	4.2 $M_{\rm L}$	39.27°	78.27°
7	1998-067 :10 :47	5.01	78	4.1 $m_{\rm b}$	44.86°	80.92°
8	1998-071 :17 54	5.94	25	4.5 $M_{\rm L}$	37.66°	88.30°
9	1998-094 21 18	8.87	31	4.4 $M_{\rm L}$	40.16°	76.78°
10	1998-102 :18 07	9.56	23	4.5 $m_{\rm b}$	38.63°	78.32°
11	1998-106 05 23	4.80	29	4.1 $M_{\rm L}$	44.36°	80.98°
12	1998-137 07 38	7.36	29	$4.0 M_{\rm L}$	40.54°	79.02°
13	1998-138 07 31	8.13	47	4.5 $M_{\rm L}$	40.78°	77.68°
14	1998-153 20 34	9.25	27	$3.3 M_{\rm L}$	37.47°	78.96°
15	1998-166 07 32	9.02	30	$5.2 m_{\rm b}$	39.78°	77.04°
16	1998-169 01 12	3.73	25	$4.5 M_{\rm S}$	43.36°	82.73°
17	1998-176 06 39	6.03	26	5.4 $m_{\rm b}$	41.41°	80.33°
18	1998-182 02 #3	9.00	32	4.4 $M_{\rm L}$	40.46°	76.95°
19	1998-198 02 #1	6.55	13	4.3 $M_{\rm L}$	41.73°	79.39°
20	1998-208 :19 36	5.15	15	$4.0\ M_{\rm L}$	41.21°	81.62°
21	1998-209 04 51	5.03	33	$5.4 M_{\rm S}$	41.75°	81.54°
22	1998-211 :19 :00	5.48	21	4.2 $M_{\rm L}$	41.03°	81.35°
23	1998-216 21 38	5.25	28	$4.6M_{\rm S}$	40.74°	81.76°

表1 乌鲁木齐台地震记录

分析图 6、7 可见,在信噪比较高时,几种方法给出的 P 波初至误差都比较小,但在信噪比较低于 10 dB 时,传统 AIC 算法的估计误差增大(图 6(a)),而改进的混合方法的初至估计误差比较小(图 6(d)); 对于后续 S 波或 Lg 波的初至估计,当信噪比低于 10 dB 时,传统的 AIC 算法估计的初至误差有的非常大(图 7(a)),主要原因是后续 S 波或 Lg 波通常和 P 波的尾波、背景噪声等混合在一起,使得 S 波或 Lg 波的初动很不清楚,在信噪比较低时,几种震相的叠加造成 AIC 算法的失效.本文提出的这种基于 AIC 算法和 幅值比的混合方法有效地克服了这一缺陷(图 6(d)).

3 讨论

相对于人工分析结果,估计的信号初至基本上都有延迟.这与文献 8]和文献 10]的结果是一致的. 主要原因是当信噪比较低时,为提高信噪比要进行带通滤波,而频率滤波会造成信号的相移.在选择滤波频带时,我们采用文献 11]给出最佳滤波频带的方法,具体做法是:







(d) 信嗓比/dB

(1)首先给定一组滤波器组 如频带分别为 0.1~0.3 Hz 0.3~0.7 Hz 0.7~1.5 Hz 1.5~3.6 Hz, 3.6~8.3 Hz 和 8.3~9.9Hz:

(2)对于原始初至估计的数据段,首先计算原始数据的信噪比,如果信噪比大于规定的域值,则不再 选择最佳频带,直接利用原始数据进行处理;

(3) 如果原始数据的信噪比小于规定的域值 利用上述滤波器组对原始数据进行滤波 得到滤波后的 一组数据,分别计算每一组数据中的信噪比;

(4)确定滤波后信噪比最大的滤波频带,以此为中心比较邻近频带滤波后的信号信噪比,如果信噪比 大干规定域值 则频带自动拓宽到邻近频带 由此自动确定最佳滤波频带.

最佳滤波频带确定之后 使用 3 阶 Butterworth 滤波器对原始数据进行带通滤波得到信噪比提高的数 据. 这样处理的目的是尽可能得到比较宽的滤波频带 从而减小带通滤波造成的信号相移.

基于 AR 模型估计信号初至时 ,模型阶数对初至估计结果影响比较大 ,采用合理的阶数 ,估计出的结 果误差比较小.确定 AR 模型阶数的方法很多,其中常用的有最终预测误差准则和信息论准则^{12]}.模型阶 数确定后,用经典的 Levinson – Durbin 方法就可以得到 AR 模型的系数.

4 结论

(1)对于高信噪比的信号本文提出的方法和传统的 AIC 算法的估计结果一致.对于低信噪比的信号,AIC 值对信号幅频特性的变化非常敏感,利用 AIC 曲线的极小点估计的信号初至误差非常大,而信号幅值比曲线要稳定的多,将计算的 AIC 曲线和幅值比曲线线性叠加,对叠加曲线经过类似于坐标旋转的处理,利用校正后的叠加曲线估计信号初至既克服了 AIC 值过于灵敏的缺点,又吸收了幅值比变化稳定的优点,使得估计的信号初至要好于传统算法的结果;

(2)相对于人工分析结果,传统的AIC 算法和本文给出的改进算法估计的信号初至都有延迟,主要原因是带通滤波造成信号相移.因此实际数据处理中对于信噪比高的数据不必作滤波,对于信噪比低的数据 要尽可能选择比较宽的滤波频带,以减小滤波造成的相移.

[参考文献]

- [1] Allen R V. Automatic earthquake recognition and timing from signal trace[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1978, 68 1521–1532.
- [2] Allen R V. Automatic phase pickers their present use and future prospects[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1982 72 \$225-242.
- [3] GSE/JAPAN/40. A Fully Automated Method for Determining the Arrival Times of Seismic Waves and its Application to an on line Processing System[R]. In Paper tabled on the 34thGSE Session Geneva 1992. GSE/RF/62.
- [4] Cheng Tong ,Brian L N Kennett. Automatic seismic event recognition and later phase identification for broadband seismograms [J]. Bull. Seism. Soc. Am. ,1996 86 1896—1909.
- [5] Mitchell W ,Richard A. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1998 88 95—106.
- [6] Kanwaldip S A ,Farid U D. Wavelet transform methods for phase identification in three component seismograms J]. Bull. Seism. Soc. Am. , 1997 87 1598—1612.
- [7] Chao ying Bai ,B L N Kennett. Automatic phase detection and identification by full use of a single three component broadband seismogram
 [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 2000 90 :187—198.
- [8] M Leonard. Comparison of Manual and Automatic Onset Time Picking J J. Bull. Seism. Soc. Am. 2000 90 :1384-1390.
- [9] "IDC Processing of Seismic ,Hydroacoustic and infrasonic data "[R]. IDC Documentation. http://www.pidc.org.
- [10] GSE/NOR/102. Automatic Onset Time Estimation based on Autoregressive Processing R]. 1996.
- [11] Richard R L , Farid U D , Craig A S. Optimal filter parameters for low SNR seismograms as a function of station and event location [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors ,1999 ,113 213—226.
- [12] 宗孔德 胡广书 数字信号处理 M] 北京 清华大学出版社 1988.

ACCURATE ESTIMATION FOR ARRIVAL TIME OF SEISMIC WAVE

WANG Hai-jun^{1 2}, JIN Ping², LIU Gui-zhong¹, WANG Xiao-ming²

(1. Xi'an Jiaotong University Shaanxi Xi'an 710049 , China ;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology Shaanxi Xi'an 710024 China)

Abstract: In automatic processing of seismic records ,based on the method of autoregressive Akaike information criteria(AIC) and the amplitude ratio between signal and noise ,a hybrid method for estimating arrival time of seismic phase is presented in this paper. Using the curve of AIC and the curve of amplitude ratio a new curve is constracted ,which is transformed by a similarly rotation of coordinate. The new curve can accurately estimates arrival time of signal in automatic processing especially for later phases(such as S-wave ,Lg-wave) with low ratio of signal and noise. The arrival times for 23 seismic P-phases and later phases recorded at WMQ station in CDSN are picked by the new method. In comparison of manual result , the root mean square error of P-phase is 0.71 second , and one of later phase is 1.64 second , which is better than the result obtained by traditional AIC algorithm.

Key words Seismic wave ; Automatic processing ; Arrival time ; Amplitude ratio