

文章编号:1673-064X(2005)02-0065-04

时间延迟估计的循环相关法

Circular correlation method of time delay estimation

李大卫, 尹成, 马洪艳

(西南石油学院 电子信息工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:依据离散时间序列的长度有限性,将其扩充为以序列长度为周期的周期序列,又依据周期序列的相关原理——循环相关,对信号进行时间延迟估计.由于循环相关的平稳特性,即使在较大延迟量存在的情况下,仍然能够达到准确的时延估计效果.模拟得到了不同强度的高斯噪声或不同时间延迟量下的广义相关能量图和循环相关能量图.模拟实验结果表明,在低信噪比或大延迟量的环境下,循环相关时延估计方法比广义相关时延估计方法具有明显的优势.

关键词:广义相关;循环相关;时间延迟估计;信噪比

中图分类号:TM935.27 **文献标识码:**A

在时延估计的广义相关法中^[1-10],滤波后的传感器输出是互相关的,并将互相关估计取峰值时的滞后取作时延的估计.问题是,当加性噪声双方含有相同的信号和各自到达的时间差时,广义相关法将失效.正是在这种情况下,循环相关显示出它独特的优势,应用期望信号的二阶循环平稳性,突出有效信号的相关峰值,从而达到最佳的时延估计效果,本文也正是在这种思想下诞生的.计算机模拟试验表明,对于低信噪比或是大时延量信号,与广义相关相比,循环相关时延估计方法具有明显的优势.

1 信号的广义相关与循环相关

设离散信号 x_n, y_n 分别为

$$x_n = \begin{cases} x_n, 0 \leq n \leq N-1, \\ 0, \text{其他}, \end{cases} \quad (1)$$

$$y_n = \begin{cases} y_n, 0 \leq n \leq L-1, \\ 0, \text{其他}, \end{cases} \quad (2)$$

则信号 x_n 和 y_n 的广义互相关可以表示为

$$r_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x_{n+k} y_k. \quad (3)$$

为了便于讨论,把 x_n, y_n 都扩充为以 N 为周期的周期信号 \tilde{x}_n, \tilde{y}_n , 则其广义相关就可以用周期信号的循环相关的形式表示^[11].

设 \tilde{x}_n, \tilde{y}_n 是 x_n, y_n 的以 N 为周期的周期信号,即

$$\tilde{x}_n = x_n, \tilde{y}_n = y_n, (0 \leq n \leq N-1). \quad (4)$$

\tilde{x}_n 与 \tilde{y}_n 的循环相关为

$$\tilde{r}_{\tilde{x}\tilde{y}}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}_{n+k} \tilde{y}_k = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}_{n+k} y_k. \quad (5)$$

假定 $L \leq N$, 由式(2), 式(5)知

$$\tilde{r}_{\tilde{x}\tilde{y}}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{x}_{n+k} y_k. \quad (6)$$

在式(6)中,当 $0 \leq n \leq N-L$ 时有 $0 \leq n+k \leq N-1$, 根据式(4), 式(6)有

收稿日期: 2004-11-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2003AA602110-5)和四川省应用基础研究项目(01GY051-31)资助.

作者简介: 李大卫(1978-), 男, 吉林松原人, 博士, 主要从事地震资料数字处理及油气解释方面的研究.

$$\tilde{r}_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x_{n+k} y_k, (0 \leq n \leq N-L), \quad (7)$$

将上面的结果与式(3)比较, 使得

$$r_{xy}(n) = \tilde{r}_{xy}(n), (0 \leq n \leq N-L); \quad (8)$$

此外, 根据式(1), (6) 和(7), 有

$$\tilde{r}_{xy}(n) = r_{xy}(n) + \Delta, (n > N-L). \quad (9)$$

其中 Δ 为两种方法的相关差值, 其大小除与信号本身的数值有关外, 还与 $n - (N-L)$ 的大小有关. 在不考虑信号本身的数大小的情况下, $n - (N-L)$ 越大, Δ 在数值上越大. 另外, 根据周期信号的性质不难证明, 当 \tilde{r}_{xy} 和 r_{xy} 取得最大值时, Δ 也取得最大值, 即

$$\tilde{r}_{\max} = r_{\max} + \Delta_{\max}. \quad (10)$$

其中, \tilde{r}_{\max} , r_{\max} 和 Δ_{\max} 分别为 \tilde{r}_{xy} , r_{xy} 和 Δ 的最大值.

2 广义相关与循环相关的时延估计

首先假设两个空间分离的传感器上接收到的离散信号为

$$x(n) = s(n) + n_1(n), \quad (11)$$

$$y(n) = s(n-D) + n_2(n). \quad (12)$$

式中, $s(n)$ 是一零均值随机信号, $s(n-D)$ 是 $s(n)$ 的时延形式, 噪声 $n_1(n)$, $n_2(n)$ 是与信号 $s(n)$ 统计独立、空间不相关的零均值高斯平稳随机过程. 时延估计问题就是从 $x(n)$ 和 $y(n)$ 中确定时延差 D . 这里分别采用了广义相关与循环相关的最大能量来进行时延估计, 即相关最大能量值出现的位置即为时间延迟 D .

为了通过最大能量法估计时间延迟, 首先要计算最大能量, 广义相关的最大能量 E_g 可以表示为

$$E_g = (r_{xy})^2 = (r_{sxy})^2 + (r_{nxy})^2. \quad (13)$$

其中, r_{sxy} 表示信号的广义互相关, r_{nxy} 表示噪声的广义互相关.

循环相关的最大能量 E_x 可以表示为

$$\begin{aligned} E_x &= (\tilde{r}_{xy})^2 \\ &= (\tilde{r}_{sxy})^2 + (\tilde{r}_{nxy})^2 \\ &= (r_{sxy} + \Delta_s)^2 + (r_{nxy} + \Delta_n)^2. \end{aligned} \quad (14)$$

其中, \tilde{r}_{sxy} 表示信号的循环互相关, \tilde{r}_{nxy} 表示噪声的循环互相关, Δ_s 为信号的相关差值, Δ_n 为噪声的相关差值.

由于有效信号与噪声信号到达时间不同, 所以一般来说有效信号与噪声信号都有各自的能量峰值^[12]. 为了让估计出的有效信号的时间延迟不被噪声延迟所混淆, 就必须使有效信号的相关能量大于噪声信号的相关能量. 从式(10)知

$$\tilde{r}_{\max} - r_{\max} = \Delta_{\max}, \quad (15)$$

由于 \tilde{r}_{\max} , r_{\max} 和 Δ_{\max} 都为正值, 所以式(15)又可以写成

$$|\tilde{r}_{\max}| - |r_{\max}| = |\Delta_{\max}|. \quad (16)$$

式(16)对于有效信号和噪声信号都是成立的, 但区别在于 Δ_{\max} 的不同, 对于有效信号来说, 此时信号是相关的, 所以 Δ_{\max} 为一相对较大的正值, 而对于噪声来说, 此时相关的概率很小, 所以根据高斯分布的相关特性, 有 $E(\Delta_{\max}) = 0$. 所以相对于广义相关, 循环相关使有效信号相关能量峰增大, 而没有增加噪声信号相关能量, 这也正是时延估计中循环相关优于广义相关的主旨所在.

3 模拟试验

模拟信号是采样间隔为 1 ms 的有限时间序列, 总长度为 300 ms, 所加噪声则为满足标准高斯分布的白噪声. 实验中, 噪声是按照与有效信号的振幅比例加入的, 对原信号与延迟信号施加相同比例的不同噪声后, 分别计算其广义互相关与循环互相关, 为了便于比较, 只取广义相关数据中与循环相关长度对应的那部分.

在相关能量图中, 最大瞬时相关能量所对应的时间延迟即被看作有效信号的延迟时间, 有效信号的瞬时相关能量峰值越突出则说明估计效果越好, 相反则越差. 因此, 如果噪声的瞬时相关能量峰值超过有效信号的瞬时相关能量值, 此时噪声的到达时间将会被误认为是有效信号的到达时间, 使估计发生错误.

实验中,为了比较在不同强度的噪声干扰下两种估计方法的性能,将图 1 中延迟信号相对于原信号的时间延迟固定为 60 ms,可以看到,随着噪声比

例的增大,广义相关的有效信号部分瞬时相关能量峰值与噪声部分瞬时相关能量峰值差距逐渐缩小,而相对于循环相关来说,两者差距变化则并不太大.

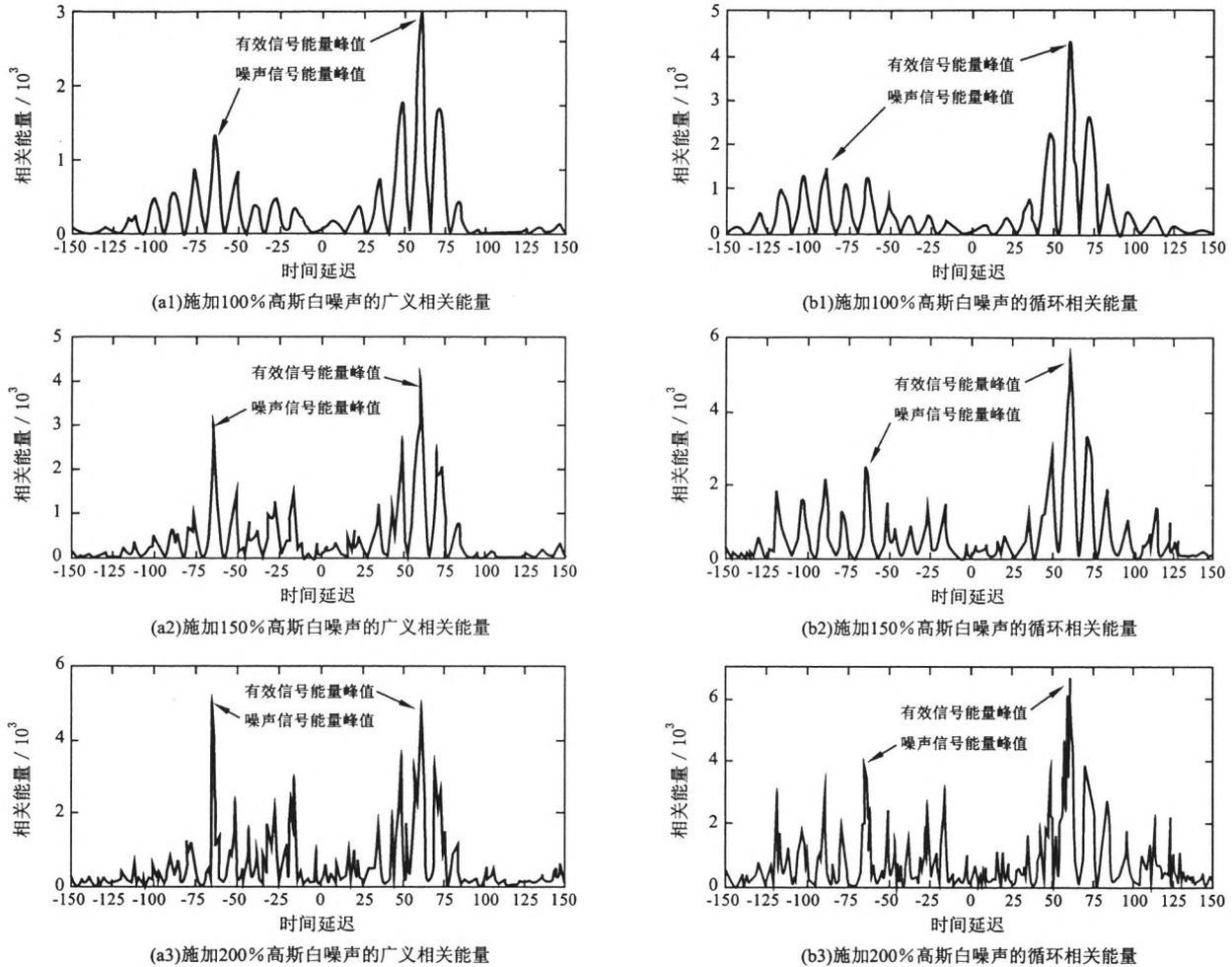
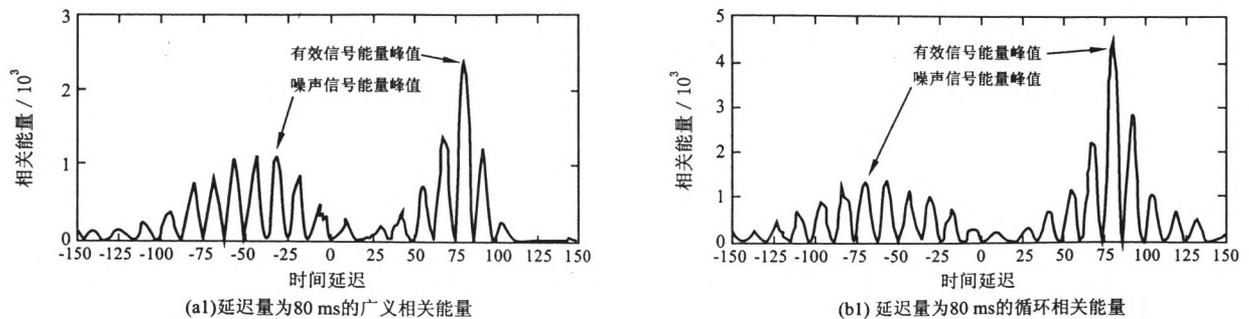


图 1 不同强度高斯噪声下的广义相关与循环相关能量图(时间延迟为 60 ms)

为了比较不同的时间延迟量对广义相关与循环相关估计方法的影响,图 2 中将噪声比例固定为 100%. 能够看出,时间延迟越大,循环相关的估计效

果越优于广义相关. 可见循环相关法是一种更适合于低信噪比、大延迟量的时延估计方法.



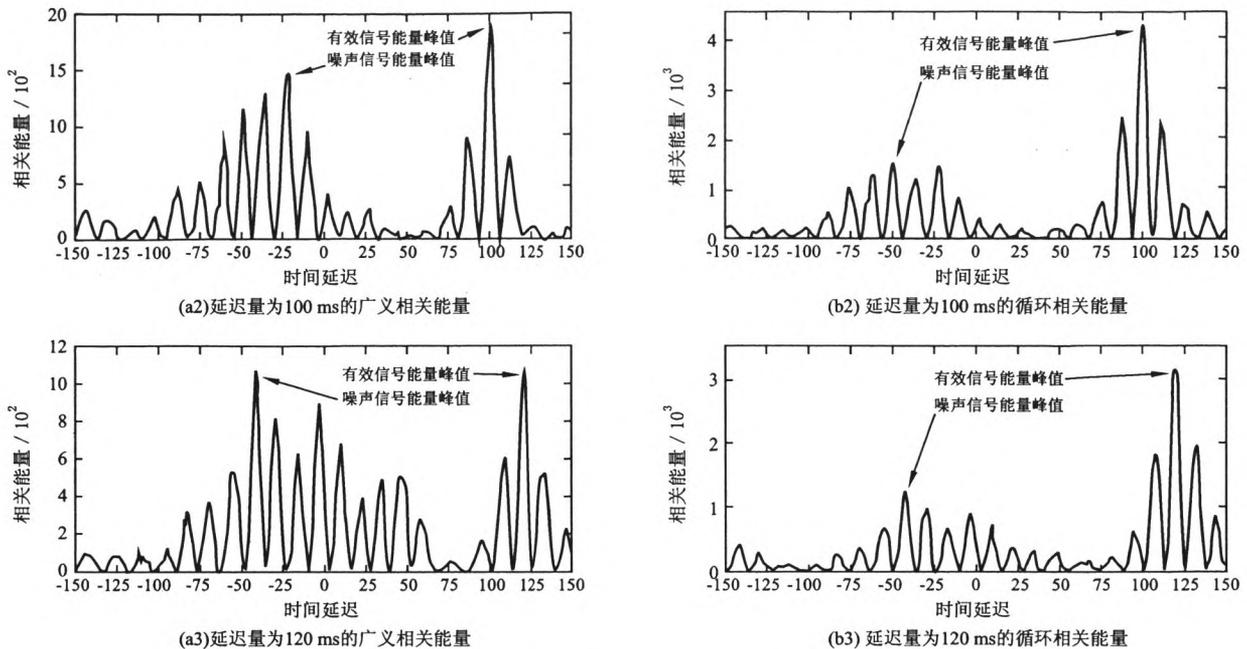


图2 不同时间延迟量下的广义相关与循环相关能量图

4 结 论

通过循环相关与广义相关最大能量法时延估计的理论推导和模拟实验对比,说明循环相关在突出有效波、抑制高斯噪声干扰方面是优于广义相关的,也正是这个原因,越是在低信噪比环境中,循环相关时延估计方法的优越性越能得到充分的体现.此外模拟实验也表明,在时间延迟量较大的情况下,应用循环相关进行时延估计同样优于广义相关.但是,循环相关也有其自身的局限性,那就是在应用循环相关时必须将非周期的时间序列扩充为以序列长度为周期的周期序列,问题是如果序列本身就含有周期分量,而这个分量的周期又刚好与原序列长度成倍数关系时,采用循环相关进行时延估计将陷入误区.所以一般来说,除非在其他的时延估计方法得不到可靠结果的低信噪比、大延迟量情况下才采用循环相关法来估计时间延迟,在一般情况下还是少用此方法为宜.

参 考 文 献:

[1] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on ASSP, 1976, 24(4): 320-327.

[2] Carter G C. Coherence and time delay estimation[J]. Proc of the IEEE, 1987, 76(2): 236-255.

[3] Piersol A G. Time delay estimation using phase data[J]. IEEE Trans on ASSP, 1981, 29(3): 471-477.

[4] Zhao Zhen, Hou Ziqiang. The generalized phase spectrum method for time delay estimation[J]. ICASSP'84, 1984, 46(2): 1-4.

[5] Nikias C L, Pan R. Time delay estimation in unknown Gaussian spatially correlation noise[J]. IEEE Trans on ASSP, 1988, 86(11): 1706-1714.

[6] Chiang H H, Nikians C L. A new method for adaptive time delay estimation for non-Gaussian signals[J]. IEEE Trans on ASSP, 1990, 88(2): 209-219.

[7] Chan Y T, Kiley J M, Plant J B. A parameter estimation approach to time delay estimation and signal detection[J]. IEEE Trans on ASSP, 1980, 28(1): 8-16.

[8] Chan Y T, Kiley J M, Plant J B. Modeling of the delay and its application to estimation and signal detection[J]. IEEE Trans on ASSP, 1981, 29(3): 577-581.

[9] Reed F A, Fintuch P L, Bershad N J. Time delay estimation using the LMS adaptive filter—static behavior [J]. IEEE Trans on ASSP, 1981, 29(3): 561-571.

[10] Youn D H, Ahmed N, Carter G C. On using the LMS algorithm for time delay estimation[J]. IEEE Trans on ASSP, 1982, 80(5): 789-801.

[11] 程乾生. 信号数字处理的数学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 2-19.

[12] 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 1-100.