

非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法

沈艳林^{1,2}, 周利坤¹, 李明², 肖玮²

(1.武警后勤学院 军交运输系, 天津 300309; 2.后勤工程学院 信息工程系, 重庆 401311)

摘要:针对非半周期采样信号的相位差估计问题,提出一种非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法。首先,利用频率估计的相位匹配方法对采样信号进行频率估计,得到采样信号的频率估计值;其次,对采样信号进行互相关,得到互相关信号,并通过采样信号的信号时移和互相关构造一路新的互相关信号,使两路互相关信号具有相同的误差项;然后,利用两路互相关信号得到相位校正互相关信号;最后,利用相位校正互相关信号和频率估计值获得采样信号的相位差估计值。理论分析表明,该方法消除了采样信号非半周期采样对相位差估计的影响,无需预知信号幅值即可实现采样信号相位差的无偏估计。为验证所提方法的有效性和优越性,在不同相位差、信噪比和信号长度条件下对本文方法进行了仿真实验,并利用科氏流量计进行了应用实验。仿真实验结果表明,本文方法有效提高了非半周期采样信号的相位差估计精度,其相位差估计精度优于互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法的相位差估计精度,更接近克拉美罗下限。科氏流量计流量测量实验验证了本文方法在实际应用中的有效性。

关键词:相位差估计; 相位校正; 非半周期采样信号; 频率估计

中图分类号:TN911

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)04-0145-06

Phase Correction Correlation-based Phase Difference Estimation Method for Non-half Period Sampled Signals

SHEN Yanlin^{1,2}, ZHOU Likun¹, LI Ming², XIAO Wei²

(1.Dept. of Military Traffic and Transport, Logistics Univ. of PAP, Tianjin 300309, China;

2.Dept. of Info. Eng., Logistical Eng. Univ., Chongqing 401311, China)

Abstract: Aiming at the problem of phase difference estimation for non-half period sampled signals, a phase correction correlation-based of phase difference estimation for non-half period sampled signals was proposed. Firstly, a phase match-based frequency estimation method was utilized to estimate the frequency of sampled signals. Secondly, cross-correlation signals were gained by cross-correlation of sampled signals and the new cross-correlation signals were constructed by shifting sampled signals and cross-correlation, which had the same error term with the original cross-correlation signals. Thirdly, phase correction cross-correlation signals were gained by means of two cross-correlation signals. Finally, estimated phase difference was obtained by utilizing phase correction cross-correlation signals and estimated frequency. Theoretical analysis indicated that the proposed method had eliminated the influence of non-half period sampled signals on phase difference estimation, and achieved unbiased phase difference estimation without estimating signal amplitudes. To validate the effectiveness and superiority of the proposed method, simulation on conditions of different phase differences, signal-to-noise ratios (SNRs), signal lengths was performed. Then, the application experiment was conducted by using Coriolis mass flowmeters. Simulation and experimental results demonstrated that the proposed method improved the estimation precision of phase difference. Its estimation performance was better than those of the cross-correlation method, the data extension-based correlation method and the quadrature delay estimator and its estimation errors were closer to CRLB by comparison. The measurement results of Coriolis mass flowmeters validated the effectiveness of the proposed method in practice.

Key words: phase difference estimation; phase correction; non-half period sampled signals; frequency estimation

收稿日期:2016-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61601493);武警部队应用项目资助(WHK15-8);重庆市研究生科研创新项目资助(CYB14100)

作者简介:沈艳林(1987—),男,讲师,博士。研究方向:信号处理。E-mail: shenyanlin870629@163.com

网络出版时间:2017-07-21 11:31:30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20170721.1131.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

相位差估计广泛应用于雷达、声呐、激光测距、故障诊断、电力电子、仪器仪表等领域^[1-4]。例如,科氏流量计通过测量两路振动信号的相位差和频率获得流体的质量流量,相位式激光测距仪通过测量光波往返的相位差获得目标的待测距离。因此,采样信号相位差的精确估计具有重要的研究意义和研究价值。

为获得两路采样信号的相位差,互相关(generalized cross-correlation, GCC)方法^[5-7]通过计算两路采样信号时延为零的互相关信号和自相关信号获得两路采样信号的相位差估计值。该方法计算原理简单,计算量小,无需预知采样信号的频率即可获得相位差估计值,但受采样信号噪声的自相关和非半周期采样的影响,该方法抗噪性较差,估计精度较低。为抑制采样信号的非半周期采样对互相关方法的影响,数据延拓式相关(data extension-based correlation, DEC)方法^[8]通过采样信号的数据延拓使数据延拓信号接近半周期采样,并利用数据延拓信号和互相关方法获得两路采样信号的相位差。该方法有效抑制了采样信号的非半周期采样对相位差估计的影响,但由于该方法仍需通过采样信号时延为零的自相关计算相位差,所以其抗噪性较差,且受反余弦函数对噪声敏感程度不同的影响,该方法在相位差较小时估计精度较差。为改善相位差估计的抗噪性,移相相关法^[9-10]通过移相自相关和移相互相关计算两路采样信号的相位差,其相位差估计性能得以改善,但为获得高精度的相位差估计值,该方法要求准确实现两路采样信号的 2π 相移和半周期采样,这限制了该方法的广泛应用。正交时延估计(quadrature delay estimator, QDE)方法^[11-14]通过两路采样信号的时移实现 $\pi/2$ 相移,获得采样信号的正交分量,利用两路采样信号及其正交分量的互相关获得相位差估计值。该方法计算量小,实时性强,但要求根据采样信号的频率设置适当的采样频率才能准确实现采样信号的 $\pi/2$ 相移。当相移角度不恰好为 $\pi/2$ 时,该方法为有偏估计。

为改善非半周期采样信号相位差估计的抗噪性,提高估计精度,提出一种非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法。该方法根据互相关信号的误差项构造一个新的互相关信号;通过两个互相关信号的误差项相消获得相位校正互相关信号,消除非半周期采样对互相关信号和相位差估计的影响;利用相位校正互相关信号和频率估计值求解相位差估计值,消除未知信号幅值对相位差估计的影响,旨在改善相位差估计方法的抗噪性,在采样信号为非半周期采样的条件下实现相位差的无偏估计。

1 方法原理

不失一般性,设两路采样信号 x 和 y 分别为:

$$\begin{cases} x(n) = A \cos(\omega n + \theta_1) + z_1(n), \\ y(n) = B \cos(\omega n + \theta_2) + z_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 和 ω 分别为两路采样信号的长度和频率, A 和 B 分别为两路采样信号的幅值, θ_1 和 θ_2 分别为两路采样信号的初相位, $z_1(n)$ 和 $z_2(n)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声, $n = 1, 2, \dots, N$ 。

为获得两路采样信号的相位差,对 $x(n)$ 和 $y(n)$ 进行互相关,得到时移为零的互相关信号 R_0 为:

$$R_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)y(n) \quad (2)$$

将采样信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 代入式(2)并化简得:

$$R_0 = \frac{1}{2} AB \cos(\theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_0 + v_0 \quad (3)$$

式中: v_0 为两路采样信号的噪声之间以及噪声与信号的互相关函数值; ε_0 为互相关信号 R_0 的误差项, $\varepsilon_0 = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N AB \cos(2n\omega + \theta_1 + \theta_2)$ 。当相关长度 N 满足 $N\omega = q\pi$ (q 为整数)时, ε_0 为整周期采样倍频项 $AB \cos(2n\omega + \theta_1 + \theta_2)$ 的累加和,所以 $\varepsilon_0 = 0$;反之,倍频项为非整周期采样,所以 $\varepsilon_0 \neq 0$ 。当 $\varepsilon_0 \neq 0$ 时, ε_0 含有两路采样信号的未知初相位,导致难以利用互相关信号 R_0 获得两路采样信号相位差的无偏估计值。

为消除采样信号的非半周期采样对互相关信号和相位差估计的影响,对互相关信号进行调整,获得互相关信号 R_1 为:

$$R_1 = \frac{1}{N-2b} (NR_0 - \eta_1 - \eta_2) \quad (4)$$

式中: $\eta_1 = \sum_{n=1}^b x(n)y(n)$; $\eta_2 = \sum_{n=N-b+1}^N x(n)y(n)$; $b = \text{round}\left(\frac{\pi}{2\hat{\omega}}\right)$, $\hat{\omega}$ 为采样信号频率 ω 的估计值。

由式(4)可知,互相关信号 R_1 为:

$$R_1 = \frac{1}{N-2b} \sum_{n=b+1}^{N-b} x(n)y(n) \quad (5)$$

对互相关信号 R_1 进行化简得:

$$R_1 = \frac{1}{2} AB \cos(\theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_1 + v_1 \quad (6)$$

式中: v_1 为两路采样信号的噪声之间以及噪声与信号的互相关函数值; ε_1 为互相关信号 R_1 的误差项,

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2(N-2b)} \sum_{n=b+1}^{N-b} AB \cos(2n\omega + \theta_1 + \theta_2)。$$

为消除 ε_1 对互相关信号 R_1 的影响,分别对采样信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 时移 b 个采样点,得到时移信号 $x(n-b)$ 、

$x(n+b)$ 、 $y(n-b)$ 和 $y(n+b)$,对时移信号进行互相关,得到互相关信号 R_2 为:

$$R_2 = \frac{1}{N-2b} \sum_{n=b+1}^{N-b} [x(n-b)y(n+b) + x(n+b)y(n-b)] \quad (7)$$

对互相关信号 R_2 进行化简得:

$$R_2 = AB \cos(2b\omega) \cos(\theta_2 - \theta_1) + 2\varepsilon_1 + v_2 \quad (8)$$

式中, v_2 为两路采样信号的噪声之间以及噪声与信号的互相关函数值。

由于两路采样信号的噪声之间以及噪声和信号的互不相关,所以互相关信号 R_1 和 R_2 的期望值分别为:

$$E(R_1) = \frac{1}{2} AB \cos(\theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_1 \quad (9)$$

$$E(R_2) = AB \cos(2b\omega) \cos(\theta_2 - \theta_1) + 2\varepsilon_1 \quad (10)$$

由式(9)和(10)可知:互相关信号 R_1 和 R_2 中均含有误差项 ε_1 ,利用 R_1 和 R_2 相减可消除 ε_1 对互相关信号 R_1 和 R_2 的影响。因此,为消除未知的 ε_1 对互相关信号和相位差估计的影响,利用互相关信号 R_1 和 R_2 相减得到相位校正互相关信号 r_1 为:

$$r_1 = 2R_1 - R_2 \quad (11)$$

相位校正互相关信号 r_1 的期望值为:

$$E(r_1) = AB(1 - \cos 2b\omega) \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (12)$$

由式(12)可知:相位校正互相关信号 r_1 不再含有采样信号非半周期采样导致的误差项 ε_1 ,其相位仅为相位差 $\theta_2 - \theta_1$ 的函数。因此,相位校正互相关信号 r_1 有助于获得相位差的无偏估计。但由于 r_1 中含有两路采样信号的未知幅值,所以利用 r_1 求解相位差需要消除未知信号幅值的影响。

为消除未知信号幅值对相位差估计的影响,对采样信号 $y(n)$ 进行时移,得到时移信号 $y(n+b)$,对 $x(n)$ 和 $y(n+b)$ 进行互相关,得到互相关信号 R_3 为:

$$R_3 = \frac{1}{N-b} \sum_{n=1}^{N-b} x(n)y(n+b) \quad (13)$$

对互相关信号 R_3 进行化简,得:

$$R_3 = \frac{1}{2} AB \cos(b\omega + \theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_2 + v_3 \quad (14)$$

式中, $\varepsilon_2 = \frac{1}{2(N-b)} \sum_{n=1}^{N-b} AB \cos((2n+b)\omega + \theta_1 + \theta_2)$ 。

同理,对 $x(n+b)$ 和 $y(n)$ 进行互相关,得到互相关信号 R_4 为:

$$R_4 = \frac{1}{N-b} \sum_{n=1}^{N-b} x(n+b)y(n) \quad (15)$$

对互相关信号 R_4 进行化简,得:

$$R_4 = \frac{1}{2} AB \cos(-b\omega + \theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_2 + v_4 \quad (16)$$

式(14)和(16)中, v_3 和 v_4 为两路采样信号的噪声之间以及噪声与信号的互相关函数值。

互相关信号 R_3 和 R_4 的期望值为:

$$E(R_3) = \frac{1}{2} AB \cos(b\omega + \theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_2 \quad (17)$$

$$E(R_4) = \frac{1}{2} AB \cos(-b\omega + \theta_2 - \theta_1) + \varepsilon_2 \quad (18)$$

由式(17)和(18)可知:互相关信号 R_3 和 R_4 中均含有误差项 ε_2 ,利用 R_3 和 R_4 相减可消除 ε_2 对互相关信号 R_3 和 R_4 的影响。因此,为消除未知的 ε_2 对互相关信号和相位差估计的影响,利用 R_3 和 R_4 相减得到相位校正互相关信号 r_2 为:

$$r_2 = R_4 - R_3 \quad (19)$$

相位校正互相关信号 r_2 的期望值为:

$$E(r_2) = AB \sin b\omega \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (20)$$

由式(12)和(20)可知,两个相位校正互相关信号 r_1 和 r_2 的幅值均包括 AB ,且其相位仅为 $\theta_2 - \theta_1$ 的函数。因此,为获得两路采样信号的相位差估计值,利用 r_1 、 r_2 和频率估计值 $\hat{\omega}$ 计算得到两路采样信号的相位差 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 为:

$$\Delta\theta = \arctan \left[\frac{r_2(1 - \cos 2b\hat{\omega})}{r_1 \sin b\hat{\omega}} \right] \quad (21)$$

上述分析可知,本文方法的基本流程如下:

- 1) 根据频率估计的相位匹配方法^[15]计算两路采样信号的频率估计值 $\hat{\omega}$;
- 2) 对两路采样信号进行时移,获得时移信号 $x(n-b)$ 、 $y(n+b)$ 和 $x(n+b)$,计算互相关信号 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 ;
- 3) 利用式(11)和(19)计算两路采样信号的相位校正互相关信号 r_1 和 r_2 ;
- 4) 将 r_1 、 r_2 和 $\hat{\omega}$ 代入式(21)计算两路采样信号的相位差 $\Delta\theta$ 。

2 仿真实验

为了说明本文理论分析的正确性和方法的优越性,对本文方法、互相关方法(GCC)、数据延拓式相关方法(DEC)、正交时延估计方法(QDE)和克拉美罗下限(Cramer-Rao lower bound, CRLB)进行仿真实验。在仿真实验中,设两路采样信号为单频正弦信号,所加噪声为高斯白噪声,如无特殊说明,设定信号幅值为 $A = B = \sqrt{2}$,信号频率为146 Hz,采样频率为2 000 Hz,两路采样信号的初相位为 $\theta_1 \in [0, 2\pi)$, $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$, $\Delta\theta = \frac{\pi}{6}$,信号长度 $N=160$,每组实验各进行1 000次蒙特卡罗实验。

2.1 不同相位差条件

为比较互相关方法、数据延拓式相关方法、正交时延估计方法和本文方法在不同相位差条件下的相位差估计精度,在信噪比 $SNR=25\text{ dB}$ 、相位差为 $[0,0.5\pi]$ 时,对上述4种方法进行仿真实验,其相位差估计值的均方误差如图1所示。由图1可知,受反余弦函数对噪声敏感程度不同的影响,互相关方法和数据延拓式相关方法的相位差估计精度随着两路采样信号相位差的减小逐渐降低,且数据延拓式相关方法的估计精度优于互相关方法的估计精度。在不同相位差条件下,本文方法具有相同的估计精度,且相比于正交时延估计方法,本文方法相位差估计值的均方误差更接近克拉美罗下限。

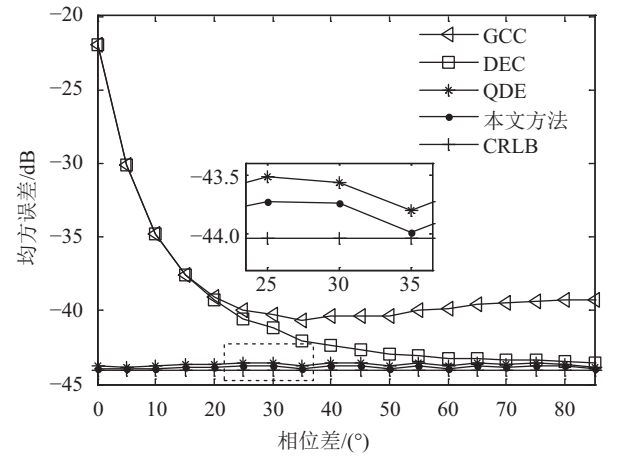


图 1 不同相位差条件下的相位差估计结果

Fig.1 Phase difference estimation results on conditions of different phase differences

2.2 不同信噪比条件

为比较互相关方法、数据延拓式相关方法、正交时延估计方法和本文方法在不同信噪比条件下的相位差估计精度,在信号频率 $\omega = 0.146\pi$ 和 $\omega = 2\pi/15$ 两种情况下,对上述4种方法进行仿真实验,实验结果如图2所示。由图2(a)可知,受采样信号非半周期采样的影响,当信噪比分别高于36和56 dB时,互相关方法和数据延拓式相关方法相位差估计值的均方误差几乎不再随着信噪比的改善而减小。由图2(b)可知,当信号频率 $\omega = 2\pi/15$ 时,数据延拓式相关方法的相位差估计性能随着信噪比的改善不断提高。由于正交时延估计方法的相移角度不等于 $\pi/2$,当信噪比高于56 dB时,正交时延估计方法的相位差估计精度不再随着信噪比的改善而提高。这说明互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法为有偏估计。本文方法的相位差估计精度随着信噪比的改善不断提高,相比于其他3种方法的相位差估计精度,本文方法相位差估计值的均方误差更接近克拉美罗下限。

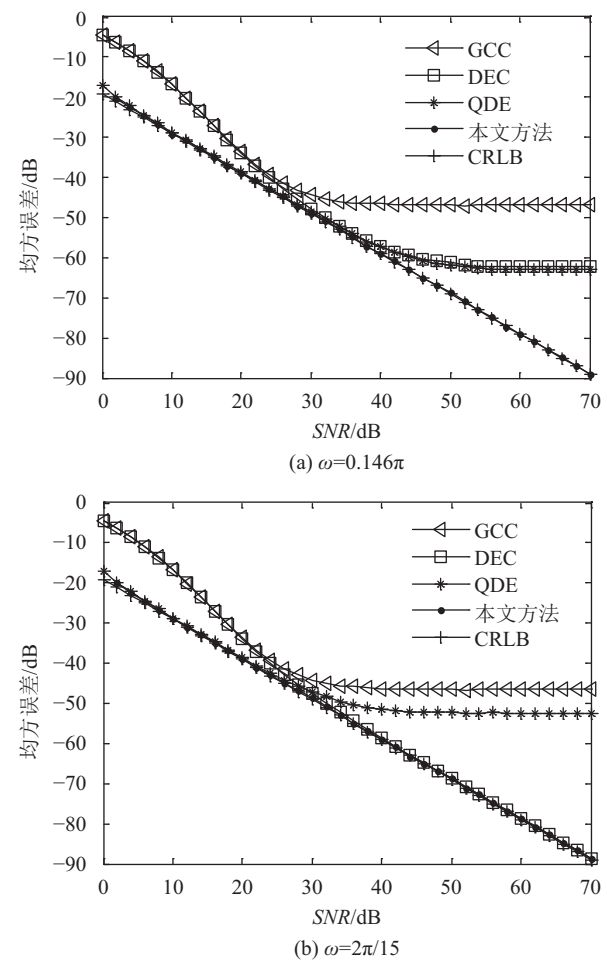


图 2 不同信噪比条件下的相位差估计结果

Fig.2 Phase difference estimation results on conditions of different SNRs

2.3 不同信号长度条件

为比较互相关方法、数据延拓式相关方法、正交时延估计方法和本文方法在不同信号长度条件下的相位差估计精度,在信噪比 $SNR=25\text{ dB}$ 、 $N \in [140, 180]$ 时,对上述4种方法进行仿真实验,实验结果如图3所示。由图3可知:随着信号长度的增加,互相关方法相位差估计值的均方误差呈周期衰减振荡趋势,数据延拓式相关方法、正交时延估计方法和本文方法的相位差估计精度不断提高,但受噪声自相关的影响,数据延拓式相关方法抗噪性较差,相位差估计值的均方误差较大。在不同信号长度条件下,本文方法相位差估计值的均方误差比克拉美罗下限约大0.17 dB,而互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法相位差估计值的均方误差比克拉美罗下限分别大3.2、2.6和0.37 dB。因此,本文方法的相位差估计精度优于互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法的相位差估计精度,更接近克拉美罗下限。

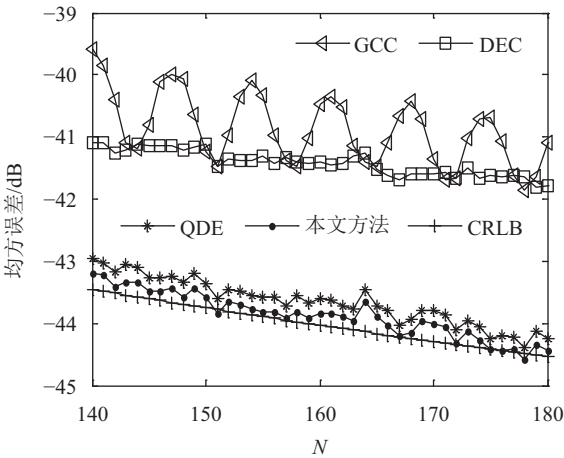


图 3 不同信号长度条件下的相位差估计结果

Fig.3 Phase difference estimation results on conditions of different signal lengths

由仿真实验结果可知, 在不同相位差、信噪比和信号长度条件下, 本文方法的相位差估计精度均十分接近克拉美罗下限, 这说明本文方法的频率估计精度能够满足相位差估计对频率估计精度的要求。

3 应用实验

为进一步考察本文所提方法的有效性和优越性, 利用RHEONIK科氏流量计对本文方法进行应用实验。科氏流量计通过测量两路传感器输出信号的相位差计算时间差, 进而获得流体的质量流量。在流量测量实验中, 选用的质量流量变送器型号为RHE08型, 流量的检测范围为5~20 kg/min, 传感器输出信号的频率在142~150 Hz之间, 采样频率设定为10 kHz, 每次利用2 000点计算两路采样信号的相位差, 实验结果如表1所示。

表 1 不同流量条件下的时间差测量结果

Tab.1 Results of time delay estimation under conditions of different flow rates

组别	流量/ (kg·min ⁻¹)	时间差 理论值/μs	时间差测量值/μs			
			GCC	DEC	QDE	本文方法
1	5.89	42.35	59.48	59.48	42.22	42.27
2	8.48	60.96	73.21	73.24	60.75	60.81
3	10.16	73.03	82.94	83.02	72.75	72.82
4	13.94	100.18	108.33	108.32	99.84	99.94

由表1可知, 在不同流量条件下, 互相关方法、数据延拓式相关方法、正交时延估计方法和本文方法的时间差测量值与理论值的绝对误差平均值分别为11.86、11.88、-0.24和-0.17 μs, 本文方法的时间差测量值与理论值的绝对误差小于互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法的时间差测量值与理论值的绝对误差, 本文方法的时间差测量值更

接近时间差理论值。因此, 相比于互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法, 本文方法具有更高的相位差估计精度, 有助于改善科氏流量计的测量精度。

4 结 论

为提高非半周期采样信号的相位差估计精度, 提出了一种非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法。该方法通过理论分析非半周期采样信号相位差估计的互相关方法有偏估计产生的根本原因, 提出利用信号时移、互相关、误差项相消等技术对互相关信号进行相位校正, 消除采样信号的非半周期采样对互相关信号和相位差估计的影响, 并在信号幅值未知的条件下利用相位校正互相关信号和频率估计值实现了采样信号相位差的无偏估计。仿真实验结果表明: 本文方法的相位差估计精度优于互相关方法、数据延拓式相关方法和正交时延估计方法的相位差估计精度, 更接近克拉美罗下限。科氏流量计流量检测实验结果证实了本文方法的有效性。为拓展本文方法的应用范围, 作者下一步将对非平稳流量条件下科氏流量计信号的相位差估计问题进行研究。

参考文献:

[1] Yang J R.Measurement of amplitude and phase differences between two RF signals by using signal power detection[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2014, 24(3):206–208.

[2] Lim J S,Pang H S.Time delay estimation method based on canonical correlation analysis[J].Circuits,Systems,and Signal Processing,2013,32(5):2527–2538.

[3] Assous S,Linnelt L.High resolution time delay estimation using sliding discrete Fourier transform[J].Digital Signal Processing, 2012,22(5):820–827.

[4] Tu Yaqing,Yang Huiyue,Zhang Haitao,et al.CMF signal processing method based on feedback corrected ANF and Hilbert transformation[J].Measurement Science Review, 2014,14(1):41–47.

[5] Liang Yurong,Duan Huizong,Yeh H,et al.Fundamental limits on the digital phase measurement method based on cross-correlation analysis[J].Review of Scientific Instruments, 2012,83(9):095110.

[6] Shaswary E,Tavakkoli J,Xu Yuan.A new algorithm for time-delay estimation in ultrasonic echo signals[J].IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control,2015,62(1):236–241.

[7] Li Jianmin,Zhao Peng,Hou Wen,et al.Research on error of

phase difference algorithm based on correlation theory[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition),2009,30(6):616–619.[李建民,赵鹏,侯文,等.基于相关理论的相位差算法的误差研究[J].中北大学学报(自然科学版),2009,30(6):616–619.]

[8] Shen Ting’ao,Tu Yaqing,Li Ming,et al.Research and validation on improved correlation method for phase difference measurement based on data extension[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(6):1331–1337.[沈廷鳌,涂亚庆,李明,等.数据延拓式相关的相位差测量方法及验证[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1331–1337.]

[9] Liu Yuzhou,Zhao Bin.Phase-shift correlation method for accurate phase difference estimation in range finder[J].Applied Optics,2015,54(11):3470–3477.

[10] Liu Yuzhou,Zhao Bin.Study on phase difference algorithm based on phase-shift correlation analysis[J].Laser Technology,2014,38(5):638–642.[刘玉周,赵斌.移相相关法计算相位差的研究[J].激光技术,2014,38(5):638–642.]

[11] So H C.A comparative study of two discrete-time phase delay estimators[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2005,54(6):2501–2504.

[12] Maskell D L,Woods G S.Adaptive subsample delay estimation using a modified quadrature phase detector[J].IEEE Transactions on Circuits And Systems II (Express Briefs), 2005,52(10):669–674.

[13] Maskell D L,Woods G S.The discrete-time quadrature subsample estimation of delay[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2002,51(1):133–137.

[14] Shen Ting’ao,Tu Yaqing,Li Ming,et al.An improved method for phase difference measurement based on correlation theory[J].Journal of Vibration and Shock,2014,33(21): 177–182.[沈廷鳌,涂亚庆,李明,等.基于相关原理的相位差测量改进算法及应用[J].振动与冲击,2014,33(21):177–182.]

[15] Shen Yanlin,Tu Yaqing,Chen Linjun,et al.A phase match based frequency estimation method for sinusoidal signals[J]. Review of Scientific Instruments,2015,86(4):045101.

(编辑 赵 婧)

引用格式:Shen Yanlin,Zhou Likun,Li Ming,et al.Phase correction correlation-based phase difference estimation method for non-half period sampled signals[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(4):145–150.[沈艳林,周利坤,李明,等.非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法[J].工程科学与技术,2017,49(4):145–150.]