

文章编号 1004-924X(2017)02-0547-08

归一化循环相关超声回波时延估计

李新波¹, 石要武¹, 王 猛^{1*}, 石屹然¹, 朱兰香², 梁 亮¹

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春建筑学院 电气信息学院, 吉林 长春 130022)

摘要:传统超声回波时延估计算法是在高斯噪声背景下展开研究的,而实际工况中超声回波不仅含有高斯噪声,还含有脉冲冲击噪声(α 稳定分布噪声)等,这导致传统算法失效。为了解决上述问题,本文提出了一种针对混合噪声特别是包含噪声背景下的超声回波时延估计算法:归一化循环相关时延估计算法。首先,对归一化循环相关算法理论进行了简要的介绍。接着,对归一化循环相关时延估计算法进行了理论推导分析。然后,结合仿真分析,在相同 α 混合噪声情况下对传统循环相关和归一化循环相关时延估计进行比较。最后,在不同信噪比下,对归一化循环相关时延估计算法的估计性能进行了分析。通过对比实验发现,在噪声特征指数趋于 1 时,循环相关算法已不能估计出时延,而归一化循环相关算法的误差仍能保持在 $0.4 \mu\text{s}$;且在 -10dB 信噪比下,归一化循环相关算法时延估计也能保持在 $10 \mu\text{s}$ 误差范围内。本文所提归一化循环相关算法在混合噪声特别是包含 α 噪声情况下能够对超声回波时延进行精确估计,具有传统算法所不能比拟的优势。

关键词:超声回波;时延估计;归一化循环相关; α 稳定分布噪声

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0547

Time-delay estimation of ultrasonic echo signal based on normalized cyclic cross-correlation

LI Xin-bo¹, SHI Yao-wu¹, WANG Meng^{1*}, SHI Yi-ran¹, ZHU Lan-xiang², LIANG Liang¹

(1. School of Communication Engineering, Jilin University. Changchun 130022, China;

2. College of Electric and Electronic information, Changchun Architecture and Civil Engineering college, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: wangmeng1416@126.com

Abstract: Traditional ultrasonic echo time-delay estimation algorithm is studied in the background of Gauss Noise, while in actual working condition ultrasonic echo includes not only Gauss Noise but also impulsive noise (α noise with stable distribution), which will invalidate traditional algorithms. In actual application, in order to solve the above problem, a new ultrasonic echo time-delay estimation method under mixed noise, especially the background containing α noises, was proposed, called time delay estimation algorithm with normalized cyclic correlation. Firstly, a brief introduction to theory of such normalized cyclic correlation algorithm was given and a theoretical derivation analysis on such al-

收稿日期: 2016-07-02; **修订日期:** 2016-09-19.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51475198); 吉林省青年科研基金项目(No. 20140520064); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2015M570270)

gorithm was conducted. Then, combined with simulation analysis, the performance of proposed algorithm and traditional cyclic cross-correlation algorithm were compared under the same condition. At last, the estimation performance of such normalized cyclic correlation time delay estimation algorithm was analyzed under different signal-noise ratios. Contrast test indicates that when α approaches to 1, the cyclic cross-correlation algorithm is unable to estimate the time delay, while the normalized cyclic cross-correlation algorithm still maintains the deviation at $0.4 \mu\text{s}$; and under -10dB SNR, the time delay estimated by normalized cyclic cross-correlation algorithm is also maintained within $10 \mu\text{s}$. The normalized cyclic cross-correlation algorithm proposed in the article is able to make accurate estimation of time delay of ultrasonic echo under the background of mixed noise, especially the one contains α noise, which is an incomparable advantage that traditional algorithm is unable to counteract.

Key words: ultrasonic echo; time-delay estimation; normalized cyclic cross-correlation; α stable distribution noise

1 引言

在超声波测量领域,如超声波测距、超声波测风速等,超声回波时延估计是各种测量的基础。只有准确估计出超声回波的时延,才能准确计算出需要的数据量。传统的超声波回波时延估计算法,包括互相关或者广义互相关算法^[1,2],模型匹配算法^[3],极大似然算法^[4],高阶累积量算法^[5,6]等。这些算法对仅存在高斯噪声背景时的延估计进行分析,并取得了较好的效果。但是对于实际工况,大多数情况下是各种噪声的混合,特别是含有冲击噪声的情况,这种情况下上述算法的时延估计性能随着信噪比的减小而急剧下降,甚至完全失效^[7,8]。

脉冲冲击噪声是生活中常见的一种非高斯噪声,由于其符合 α 稳定分布,因此一般的脉冲冲击噪声也叫做 α 稳定分布(S α S 分布)噪声,简称为 α 噪声。大量实验表明,在超声回波时延测量系统中不仅含有高斯噪声,而且还含有大量的 α 噪声。为了获得较高的超声回波时延估计精度,必须要充分考虑噪声背景下超声波回波的时延估计算法。因此迫切需要一种对 α 噪声、高斯噪声以及周期性的干扰噪声均具有很好抑制能力的算法。

文献[9]中,NIKIAS 指出 α 稳定分布噪声存在分数阶矩,文献[10][11]在文献[9]的基础上进行了分数阶累积量的时延估计算法研究。但是由于分数阶矩的处理算法是非线性的,计算量大而且无法得到该问题的闭式解,应用前景受到极大

限制。文献[12]提出了循环相关理论,文献[13]把循环相关理论用于次声波的时延估计,是时延估计算法研究的一个重大突破。然而却没有考虑含有 α 噪声的情况。在文献[14]中使用归一化累积量对线性 α 稳定分布的 AR 模型进行参数估计。遗憾的是该归一化的定义具有很大的局限性,仅仅适用于极点在单位圆内的情况,并不适用于混合噪声背景下超声波的时延估计。本文考虑实际应用情况,从 α 噪声的特点入手,提出了多种混合噪声背景下的归一化循环互相关超声波回波时延估计算法。首先给出了该算法的理论推导分析,并结合实际的仿真和对比分析,证实了在混合噪声背景下,该方法能够精确进行超声回波时延估计,且效果明显优于传统算法。

2 超声回波信号的模型建立

超声回波模型的选择是本文后续分析的基础,目前常用的超声回波信号有以下 3 类:

2.1 高斯信号模型^[15]

$$S(\theta, t) = \beta_g e^{-k(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi), \quad (1)$$

其中 $\theta = [\beta_g, f_c, \tau, \phi]$, β_g 指的是幅度系数, f_c 指的是中心频率, k 指的是高斯系数, ϕ 为初始相位, τ 指的是时间延迟。

2.2 混合指数模型^[16]

$$S(\theta, t) = \alpha_0 (t-\tau)^m e^{-(t-\tau)/T} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi), \quad (2)$$

其中 $\theta = [\alpha_0, T, m, f_c, \tau, \phi]$, ϕ 为初始相位, α_0 为信号的幅度, T 表示采样周期, f_c 为中心频率, τ 为时延。

2.3 双指数模型^[17]

$$u(t) = u_0 (e^{-\alpha_s t} - e^{-\beta_s t}), \quad (3)$$

其中 $t \geq 0$, u_0 是信号的幅度, α_s 和 β_s 为衰减因子。

上述 3 种模型中,混合指数模型是窄带超声波模型,常应用于超声波定位系统中;双指数模型对参数 α_s 和 β_s 要求较高,取不同的参数值结果差距很大,因此并不常用;高斯模型不仅容易实现,而且具有宽带特性,能够携带更多的信息,是超声波信号处理中最常用的模型。因此,为了不失一般性,本文选用高斯模型来进行分析。

在超声波信号模型上加入周期性干扰噪声和 α 噪声后,超声波收发过程分别如式(4)、(5)所示:

$$S(\theta, t) = e^{-kt^2} \cos(2\pi f_c(t - \tau_1)) + A \cos(2\pi f_v t) + n_1(t), \quad (4)$$

$$S(\theta, t) = \beta_g e^{-k(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t - \tau_2) + \phi) + A \cos(2\pi f_v(t - \tau_3)) + n_2(t), \quad (5)$$

上式中,中间项为加入的周期性干扰,其中 A 表示幅值,余弦函数用以控制周期性。 τ_x 表示时延(x 取 1, 2, 3)。 $n_x(t)$ 表示 α 噪声(其中 x 取 1, 2)。其表达式为^[18]:

$$n_x(t) = \exp\{jat - \gamma |t|^a [1 + j\beta \text{sgn}(t) \omega(t, \alpha)]\}, \quad (6)$$

式中 $\text{sgn}()$ 为符号函数,并且

$$\omega(t, \alpha) = \begin{cases} \tan \frac{\alpha\pi}{2} & \alpha \neq 1 \\ \frac{2}{\pi} \lg |t| & \alpha = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

由式(6),式(7)可知, α 稳定分布噪声主要由 α, β, γ, a 4 个参数决定。其中 α 为特征指数,用来度量分布函数的拖尾厚度, α 越小表明其拖尾越厚,即偏离中心值的样本数越多。 $\alpha=2$ 时该稳定分布退化为了高斯分布。 β 表示对称参数,当且仅当 $\beta=0$ 的时候,稳定分布关于 α 对称,也就是 $S\alpha S$ 分布。 γ 表示分散系数,与高斯分布的方差类似。 a 为位置参数。

3 归一化循环相关理论

3.1 循环相关理论^[12,13]

循环相关是在相关的基础上引入了循环频率。循环相关处理方法主要用于所需的循环平稳信号被噪声与干扰淹没的情况。在实际应用中,

大多数人造信号(如雷达、通信、超声波信号)都具有某种特定的循环平稳特性,而噪声和干扰一般是平稳过程,不具有这种循环平稳性。因此循环相关函数比普通相关函数具有更好的噪声抑制能力。对于循环平稳信号 $x(t)$, 循环相关的定义如下:

$$R_x^\alpha(\tau) = \langle x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-i2\pi\alpha\tau} \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t - \tau/2) x^*(t + \tau/2) e^{-i2\pi\alpha\tau} dt, \quad (8)$$

其中 τ 为延时, $\alpha = k/T$ 叫做循环频率。

循环相关有如下特性:

定理 1: 如果 $s(t)$ 为具有循环自相关函数 $R_s^\alpha(\tau)$ 的循环平稳信号,且 $s'(t) = s(t + T)$, 则有:

$$R_{s'}^\alpha(\tau) = R_s^\alpha(\tau) e^{j2\pi\alpha T}. \quad (9)$$

由定理可知,可以通过循环相关运算将信号的时延信息转化为循环自相关函数在循环频率 α 上的频移。这也就是循环相关进行时延估计的原理。

循环相关能够很好地抑制不同于信号频率的噪声,但是有一个局限就是要求发射频率和接收频率必须相同。而在超声波测量中考虑到多普勒效应,发送信号频率和接收信号频率就不尽相同,这就限制了该方法的应用。鉴于此,需要对循环相关算法进行改进。

3.2 归一化相关

Sadler B 和 Swami A 等人提出如果可以有一个极点均在单位圆内的 AR 模型描述 α 稳定分布过程 $x(n)$ ^[14], 则如下定义的归一化相关函数估计(normalized correlation estimate):

$$\hat{r}_{xx}(m) = \frac{\sum_{n=1}^N x(n) x(n+m)}{\sum_{n=1}^N x^2(n)}, \quad (10)$$

则存在。

该归一化相关函数的定义要求 α 稳定分布过程 $x(n)$ 所满足的 AR 模型的极点均在单位圆内。而当考虑到实际应用中超声回波系统中混入 α 噪声和周期性干扰噪声的情况下,该条件显然是不满足的,因此必须要对算法进行改进。

3.3 归一化循环相关函数

为了能够对超声回波系统进行时延估计,本文结合循环相关和归一化的优点,在归一化相关函数中引入了循环频率,对归一化相关函数的定

义进行了扩展,提出对于 α 稳定分布过程和周期性干扰的归一化循环相关函数的存在定理。

定理 2: 设 $x(n)$ 为服从 $S_\alpha(\gamma, \beta, a)$ 稳定分布的随机过程, 且 $0 < \alpha \leq 2$, 则如下的归一化循环相关函数:

$$r_{xx}^\alpha(m) = \frac{R_{xx}^\alpha(m)}{R_{xx}^\alpha(0)} = \frac{E[x(n)x(n+m)e^{-j2\pi\alpha n}]}{E[x^2(n)]}, \quad (11)$$

存在。

证明: 首先考察 $\alpha=0$ 的情况, 此时由归一化循环相关函数的定义知, 表达式可写成式(12):

$$\sum_{n=1}^N [x(n) - x(n+m)]^2 = \sum_{n=1}^N x^2(n) - 2 \sum_{n=1}^N x(n)x(n+m) + \sum_{n=1}^N x^2(n+m) \geq 0, \quad (13)$$

由于 $x(n)$ 服从 $S_\alpha(\gamma, \beta, a)$ 稳定分布, 因此 $x(n)$ 具有平稳各态历经性, 所以当 N 足够大时, 有

$$\sum_{n=1}^N x^2(n) = \sum_{n=1}^N x^2(n+m), \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^N [x(n) - x(n+m)]^2 = 2 \sum_{n=1}^N x^2(n) - 2 \sum_{n=1}^N x(n)x(n+m) \geq 0, \quad (15)$$

所以

$$\sum_{n=1}^N x^2(n) \geq \sum_{n=1}^N x(n)x(n+m), \quad (16)$$

将式(16)代入式(12), 有

$$r_{xx}^\alpha(m) = \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x(n)x(n+m)]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]} \leq \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]} = 1, \quad (17)$$

当 $\alpha \neq 0$ 时, 由于循环相关函数相当于原始信号的两个频移信号的互相关函数, 并且 $e^{-j2\pi\alpha n}$ 的最大幅值为 1, 因此加入循环频率后, 式(16)依然成立, 可写为:

$$\sum_{n=1}^N x(n)x(n+m) \geq \sum_{n=1}^N x(n)x(n+m)e^{-j2\pi\alpha n}, \quad (18)$$

从而得到式(19):

$$r_{xx}^\alpha(m) = \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x(n)x(n+m)e^{-j2\pi\alpha n}]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]} \leq$$

$$r_{xx}^\alpha(m) = \frac{E[x(n)x(n+m)]}{E[x^2(n)]} = \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x(n)x(n+m)]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]}, \quad (12)$$

式 $\sum_{n=1}^N [x(n) - x(n+m)]^2 \geq 0$ 必然成立, 将其展开有

则式(13)可写为

$$\frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x(n)x(n+m)]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]} \leq \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N [x^2(n)]} = 1, \quad (19)$$

这说明式(11)所示的归一化循环相关函数有界, 即对于 $x(n) \sim S_\alpha(\gamma, \beta, a)$ 的稳定随机过程, 式(11)所示的归一化循环相关函数存在。

该定理将原有的归一化相关函数的定义域进行了扩展。对于任何服从 $S_\alpha(\gamma, \beta, a)$ 稳定分布的随机过程都适用于该归一化循环互相关函数。由 α 稳定分布过程知, 定理中 α 的取值范围是 $0 < \alpha \leq 2$ 。当 $\alpha=2$ 时, 原本的稳定分布噪声就退化为了高斯噪声, 从而也证明本文所提算法不仅适用于 α 噪声, 对传统的高斯分布噪声同样也适用。

此外本文所提的归一化循环相关函数是一个线性函数, 这就在很大程度上简化了 α 稳定分布信号的分析 and 计算。考虑到线性函数的特性, 可以尝试对 α 稳定分布噪声使用常规的二阶矩方法处理, 这对 α 稳定分布信号处理具有重要的意义。

4 仿真结果与分析

首先在混合噪声背景下,分别运用基于归一化循环相关算法和基于传统的循环相关算法进行时延估计,通过比较以证实算法的有效性;然后对不同信噪比下归一化循环相关算法的有效性进行仿真验证。

4.1 同条件下归一化循环相关算法和循环相关算法仿真

实验条件如下:采样频率为 10 MHz,超声回波的高斯系数 $k=2 \times 10^8$,中心频率 $f_c=200$ kHz,幅度系数 $\beta_g=0.8$,干扰信号频率 f_v 为 180 kHz,幅度系数 $A=0.2$ (信干比(SIR)约为 2.97 dB);噪声 $n(t)$ 的对称参数 $\beta=0$,位置参数 $a=0$,分散系数 $\gamma=0.1$;时延 τ_1 为 $100 \mu s$,时延 τ_2 为 $400 \mu s$,相位 ϕ 为 0;数据长度为 5000;噪声的特征指数 α 从 1 到 2,共取 6 个点,对每个点进行 100 次相互独立的蒙特卡洛实验,计算归一化循环相关法和传统循环相关法的时延估计值和均方根误差。结果如图 1 所示。



图 1 循环相关算法在不同特征指数 α 下的时延估计值
Fig. 1 Time-delay estimation values of cyclic cross-correlation algorithm with different α

从图 1 中可以看出,当 $\alpha=1.4$ 时,时延估计的波动范围已经达到了 $\pm 200 \mu s$,而当 $\alpha=1.2$ 甚至更小的时候,该算法已不能估计出准确的时延了。由图 2 可知,当 α 趋近 1 时,均方根误差数量级达到了 10^4 ,已经不能估计出时延了。

通过图 1 和图 3 对比可知:对于相同的 α 值,循环相关算法时延估计值的波动范围大于归一化

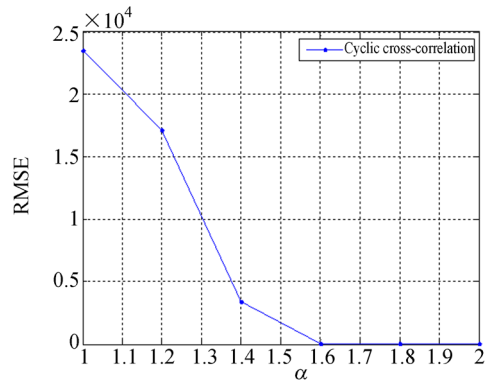


图 2 循环相关法在不同特征指数 α 下的时延估计均方根误差

Fig. 2 The RMSE of time-delay estimation of cyclic cross-correlation algorithm within different α

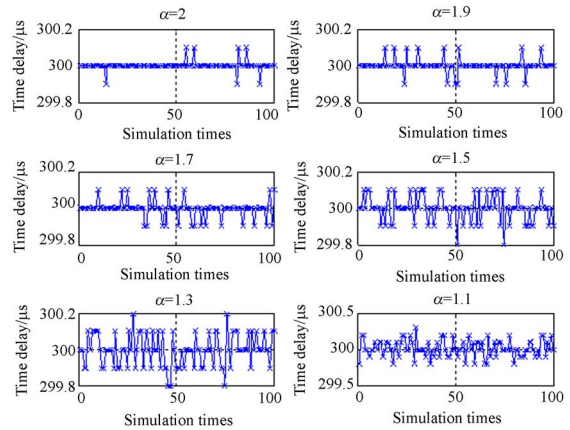


图 3 归一化循环相关法对不同特征指数 α 的时延估计值

Fig. 3 Time-delay estimation values of normalized cyclic cross-correlation algorithm with different α

循环相关算法,特别是当 α 值逐渐趋近于 1 时,从图 3 可以看出,归一化循环相关算法的时延估计误差仍然保持在 $0.4 \mu s$ 之内。图 2 和图 4 对比可以看出,在含有 α 噪声的背景下,随着 α 的值趋近 1,基于循环互相关的算法的估计性能急剧退化。而相比之下, α 取值为 1~2 时,归一化循环相关算法都能很好地进行时延估计,取得了精确的估计效果。

将图 2 与图 4 放在一起进行比较,由于低 α 值情况下,两种算法的数量级相差较大,为了使结果对比更加明显,这里对均方根误差进行取对数操作,结果如图 5 所示。

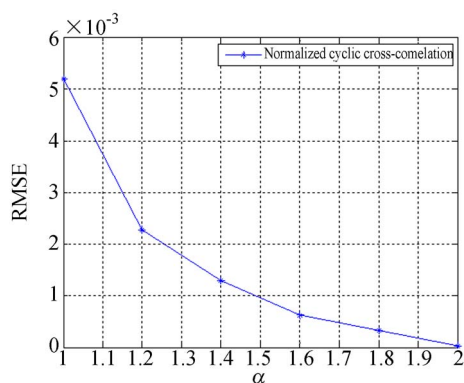


图 4 归一化循环相关法不同特征指数值 α 的时延估计的均方根误差

Fig. 4 The RMSE of time-delay estimation of normalized cyclic correlation algorithm with different α

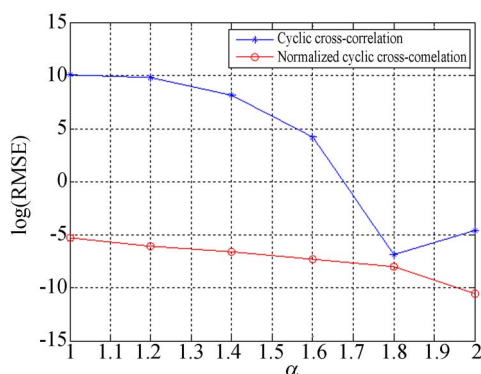


图 5 循环相关算法和归一化循环相关算法在不同 α 值下的时延估计均方根误差

Fig. 5 The log(RMSE) of time-delay estimation of cyclic cross-correlation and normalized cyclic cross-correlation algorithms under different

4.2 不同信噪比下的归一化循环相关算法仿真实验

下面进行归一化循环相关算法在不同信噪比下的可靠性实验,实验条件如下:取 α 噪声的特征指数 $\alpha=1.2$,对称参数 $\beta=0$,位置参数 $a=0$,调节分散系数 γ ,使得信噪比(SNR)从 -10 dB 变化到 20 dB,步进值为 5 dB。对每个点进行 100 次相互独立的蒙特卡洛实验,实验结果如图 6,图 7 所示。

由图 6 可知,信噪比较高的情况下,该方法能够取得很高的估计精度。在信噪比较低的情况下,如 -10 dB,也仅仅有个别点的时延估计达到了 $\pm 10 \mu\text{s}$ 。相对于其他算法,精度已经很高。

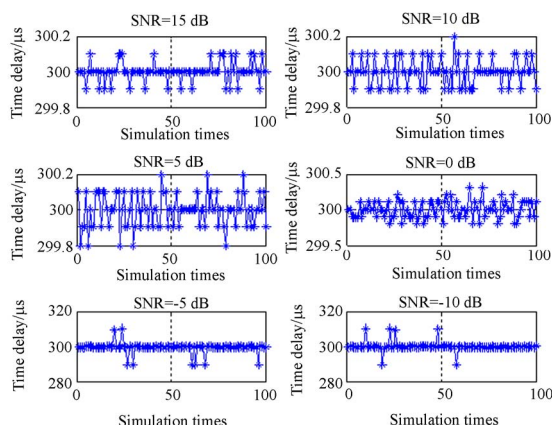


图 6 归一化循环相关法在不同信噪比下的时延估计值

Fig. 6 Time-delay estimation value of normalized cyclic correlation algorithm with different SNR values

图 7 则展示了不同信噪比下归一化循环相关算法时延估计的均方根误差,进一步充分证明了本文时延估计方法的优越性。

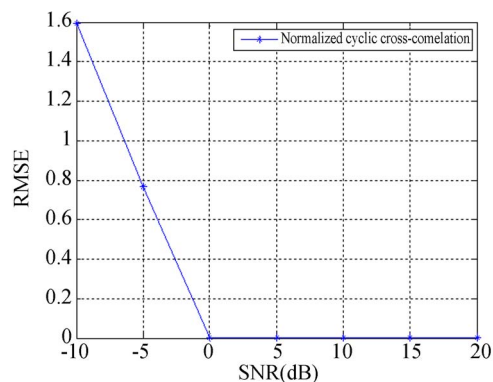


图 7 归一化循环相关法在不同信噪比下的时延估计均方根误差值

Fig. 7 The RMSE values of time-delay estimation for normalized cyclic correlation algorithm with different SNRs

5 结 论

本文提出了一种针对混合噪声,特别是包含 α 稳定分布噪声背景下的超声回波时延估计新方法——归一化循环相关的超声回波时延估计法。该方法结合了循环相关和归一化的优点,同时抑

制了各自缺点,故在包含 α 噪声和周期性干扰噪声的背景下能够更加准确地对超声回波时延进行估计。实验表明:基于归一化循环相关超声回波时延估计算法对常见的各种噪声均有很好的抑制

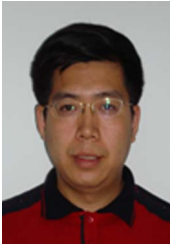
作用,在信噪比较低的情况下,归一化循环相关超声回波时延估计算法依旧能取得理想的结果。和传统算法相比,该时延估计方法更贴近实际工况,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] GARDNER W A, CHEN C K. Interference-tolerant time-difference-of-arrival estimation for modulated signals [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1988, 36 (9): 1385-1395.
- [2] KNAPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1976, 24 (4): 320-327.
- [3] XIAOLE Y, LICHEN G. Time-delay estimation of ultrasonic echoes based on the physical model matching[C]. 2012 *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, IEEE, 2012: 469-473.
- [4] CARLSON J E, SJOBERG F. Simultaneous maximum likelihood estimation of time delay and time scaling[C]. 2004 *Proceedings of the 6th Nordic Signal Processing Symposium*, 2004 NORSIG, 2004.
- [5] HONGZHI W, PEIXIN X, AIQI B. A new adaptive time delay estimation using fourth-order cumulants based on polarity iterative[C]. 2014 *International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE)*, IEEE, 2014, 1: 257-259.
- [6] WANG H, ZHAO J, QIAN L. Research of time-delay estimation based on fourth-second order normalized cumulant [C]. 2010 *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)*, IEEE, 2010, 5: 29-32.
- [7] 行鸿彦,唐娟. 时延估计方法的分析[J]. *声学技术*, 2008(1):110-114.
XING H Y, TANG J. Analysis and survey of algorithms for time-delay estimation[J]. *Technical Acoustics*, 2008(1):110-114. (in Chinese)
- [8] 赵九龙,马瑜. 三维医学图像的混合噪声去除法[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(2):340-346.
ZHAO J L, MA Y. Mixed noise removing method for three-dimensional medical images [J]. *Chinese Journal of liquid Crystals and Displays*, 2015, 30 (2):340-346. (in Chinese)
- [9] TSIHRINTZIS G A, NIKIAS C L. Fast estimation of the parameter of Alpha-stable impulsive interface [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(6):1492-1503.
- [10] 孙永梅,邱天爽. 脉冲噪声环境下的自适应时间延迟估计新方法[J]. *电子与信息学报*, 2005 (27): 740-744.
SUN Y M, QIU T SH. A new method of adaptive time delay estimation in impulsive noise environments [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005(27):740-744.
- [11] CHEN C K, GARDNER W A. Signal-selective time-difference of arrival estimation for passive location of man-made signal sources in highly corruptive environments. II. Algorithms and performance [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40 (5): 1185 - 1197.
- [12] HAYVACI H T, SETLUR P, DEVROYE N, et al.. Maximum likelihood time delay estimation and Cramér-Rao bounds for multipath exploitation [C]. *Radar Conference (RADAR)*, 2012 IEEE. IEEE, 2012:764-768.
- [13] LIANG M, XI H L, WAN G Z, et al.. The generalized cross-correlation method for time delay estimation of infrasound signal [C]. 2015 *Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, IEEE, 2015: 1320-1323.
- [14] SWAMI A, SADLER B. Parameter estimation for linear alpha-stable processes[J]. *Signal Processing Letters*, 1998, 5(2): 48-50.
- [15] DEMIRLI R, SANIIE J. Model-based estimation of ultrasonic echoes Part I: analysis and algorithms[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, 48 (3):787-802.
- [16] DA SILVA T P, CASTALDO F C. Ultrasonic anemometer based in cross correlation [C]. 2015 *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Confer-*

- ence and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). IEEE, 2015: 1-5.
- [17] 郭纲,王树勋,孙晓颖.等.超声信号的双指数模型及参数确定方法[J].电子学报,2009,37(7):1501-1504.
GUO G,WANG SH X,SUN X Y, *et al.*. Ultrasonic double exponential model and its parameter determination[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2009, 37(7):1501-1504.
- [18] MA X Y, NIKIAS C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(11):2669-2687.
- [19] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京,国防工业出版社,2001.
ZHANG X D, BAO ZH. *Non-stationary Signal Analysis and Processing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

作者简介:



李新波(1980—),男,吉林省吉林市人,博士,吉林大学通信工程学院副教授,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年至2008年在新加坡南洋理工大学作联合培养博士生,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事阵列信号处理、时频分析方面的研究。E-mail: cinple@126.com



王 猛(1991—),男,河南信阳人,2014年于中原工学院获得学士学位,主要的研究方向阵列信号处理。E-mail: wangmeng1416@126.com

(本栏目编辑:李自乐)