

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412444

基于相位补偿的高精度多路时延估计方法研究*

孙建浩¹, 姜根山¹, 张伟¹, 姜羽¹, 刘月超²

(1. 华北电力大学 北京 102206; 2. 华北电力大学(保定)数理系 保定 071003)

摘要: 锅炉声学测温非常依赖声传播时延的估计准确性与实时性。为解决传统方法只能进行整数倍采样点数的时延估计, 本文提出一种基于相位补偿的高精度多路时延估计方法, 构造正弦—啁啾复合信号, 结合广义二次互相关和全相位傅里叶变换的相位估计实现高精度时延估计。通过仿真和实验验证, 本文构造的信号在使用广义互相关方法时的精度与其他常用信号相同, 加入相位补偿后, 具有更高的精度和抗噪性, 精度提升 8.5 倍以上, 且受采样频率影响不大。本文方法在使用频分复用的多路同步时延估计中的表现与单路一致的同时, 将测量时间缩短至传统方法的 1/8, 为实现更快速更高精度的声学测温提供了有效的解决方案。

关键词: 同步时延估计; 全相位傅里叶变换; 相位估计; 频分复用

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.25

Research on high-precision multipath delay estimation based on phase compensation

Sun Jianhao¹, Jiang Genshan¹, Zhang Wei¹, Jiang Yu¹, Liu Yuechao²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Department of Mathematics and Science, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: Acoustic temperature measurement of boilers relies heavily on the estimation accuracy and real-time performance of acoustic propagation time delay. To address the limitation of traditional methods, which can only estimate the delay with integer times of the sampling points, this paper proposes a high-precision multiplexed delay estimation method based on phase compensation. This method constructs a sinusoidal-chirp composite signal, and realizes high-precision delay estimation by combining generalized cross-correlation and phase estimation with the all-phase Fourier transform. Through simulation and experimental verification, the accuracy of the signal constructed in this paper matches that of other commonly used signals when using the generalized quadratic inter-correlation method. With phase compensation, it has higher accuracy and noise immunity, improving precision by more than 8.5 times, and showing minimal impact from sampling frequency. This method maintains consistent performance in multi-channel synchronous time delay estimation using frequency division multiplexing, reducing the measurement time to 1/8 of traditional methods. It provides an effective solution to achieve faster and more accurate acoustic temperature measurements.

Keywords: synchronized delay estimation; all-phase Fourier transform; phase estimation; frequency-division multiplexing

0 引言

电站锅炉的温度测量对故障识别、运行状态检测和控制至关重要, 炉内温度高, 环境复杂, 声学测温^[1]具有非侵入式、测量范围大的优点而被广泛使用。针对炉内

温度场重建, 传播方程的推导^[2]和重建算法的优化^[3]已经比较成熟, 对于时延估计问题精度提高亟需解决。使用声学法重建温度场和流场, 对初始条件的准确性非常敏感, 声飞渡时间的精确测量直接影响了温度场重建的精度。

目前, 应用广泛的声飞渡时间的测量方法主要分为

时域法、频域法^[4]。时域方法中最有效的是互相关方法,但是在实际应用中,由于噪声的影响,信号的包络会发生失真,并且对于窄带信号,互相关函数的最大值难以确定。广义互相关方法是被采用最多的方法,使用不同的权值函数对信号的频域进行加权,能够很好地抑制噪声,得到正确的时延估计,与二次相关法^[5]结合,可以更好地去除噪声影响,使信号的相关峰更加尖锐,提高算法的准确性。

时延估计中常用的信号有 m 序列^[6],线性调频(啁啾)^[7]信号,啁啾信号具有良好的频谱特性,可以通过互谱计算时延估计,而且可以方便的控制带宽,使用频分复用(frequency division multiplexing, FDM)方法多路扬声器同时发声^[8-9],接收信号之后使用带通滤波器分离各通道再进行时延估计能够大幅缩减测量时间。上述方法计算出的时延估计值都是采样间隔的整数倍,在相关峰处进行抛物线插值^[10],可以提高估计精度,但插值法存在一定的随机性,不能完全保证准确度。

相移方法^[11-13]也可以实现采样间隔内的估计,常用的相位估计方法有相关法^[14]和频谱分析法^[15-16],相关法相位估计的分辨力受采样间隔的限制,在非整周期采样时误差较大,直接傅里叶方法含有丰富的相位信息,运算效率高,但频谱泄漏会使相位估计误差增大,加窗能够减小频谱泄漏的影响,但抗噪能力较差,全相位傅里叶变换(all-phase FFT, apFFT)具有相位不变性的特点,能够更有效地抑制频谱泄漏,是非常好的相位估计方法。然而相移方法通常对单频信号更为有效,可以估计的最大范围仅限于一个波长。

使用互相关和相位方法结合来实现高精度时延估计在超声波测距^[14,17]和通信系统^[11]比较常用,但通常使用单频信号或相位调制信号,单频信号互相关的结果比较容易混淆,在锅炉测温中不适用。相位调制信号需求带宽大^[18]且受限于扬声器的动态响应^[19],在相位发生跳变时会有严重的包络变形和滞后现象,不适用可听声频段的时延估计。同时通信系统中通常在信号传输时加入导频信号^[20]用于接收端载波同步,接收到导频信号后对信号进行参数估计从而实现相干解调,能有效地降低误码率,提升通信效率。

本文在前期研究基础上,综合时延估计和相移估计,构造了带导频的线性啁啾信号,结合广义二次相关法和相位补偿方法,实现了高精度的时延估计。

1 时延估计方法

1.1 算法原理

线性调频(啁啾)信号在时延估计中应用广泛,广义二次互相关算法在估计啁啾信号时延方面表现出色,但

受限于采样频率,只能提供整数倍采样间隔的估计。单频信号的相位估计便捷,尤其在高精度时延估计方面具有优势,但仅限于单个周期内的准确估计。为克服这些限制,本文构造一种正弦-啁啾信号,首先使用带通 FIR 滤波器进行滤波,在使用广义二次互相关方法进行整数倍采样间隔的时延估计得到 τ_n ,然后对信号使用陷波器^[14]进行单频信号提取,截取单频信号后将信号时移,进行相位估计得到 τ_p ,最后对时延进行修正得到准确的估计值。

本文算法原理如图 1 所示。

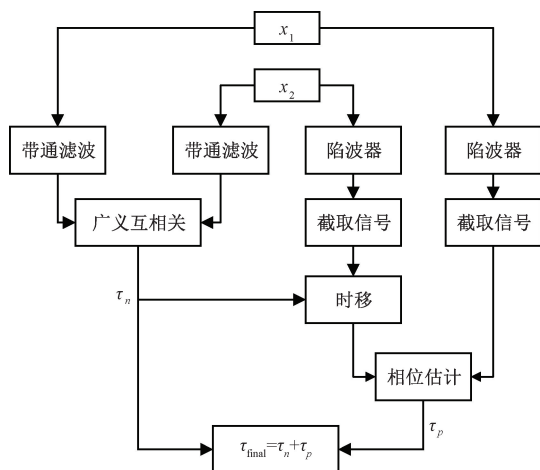


图1 算法整体流程

Fig.1 Algorithm global flow chart

1.2 信号模型

单频信号相位估计较为方便,啁啾信号在时延估计时具有较高的精度。构造带前导频的啁啾信号,信号的解析形式为:

$$s(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_0 t), & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sin\left(2\pi\left(f_0(t - t_1) + \frac{\mu(t - t_1)^2}{2}\right)\right), & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_0 为起始频率; $\mu = (2\pi B)/(t_2 - t_1)$ 为调制系数; B 为信号带宽。

图2为信号的频谱图,信号带宽较窄,使用带通滤波器可以很好的分离,也方便对多路信号的同时时延估计。

1.3 时延估计

时延接收模型可以由式(2)表示:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= s(t) + w_1(t) \\ x_2(t) &= \alpha s(t - \tau) + w_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, x_1, x_2 是接收到的信号, α 为声衰减系数, $s(t)$ 为发射信号, τ 为时间延迟, w 为零均值高斯白噪声。

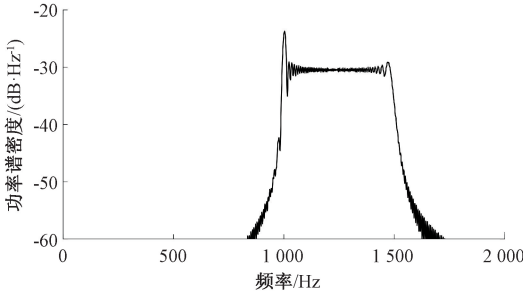


图 2 信号功率谱示意图

Fig. 2 Signal power spectrum diagram

以 T_s 为采样间隔可以写出信号的离散形式:

$$\begin{aligned} x_1(n) &= s(nT_s) + w_1(nT_s) \\ x_2(n) &= \alpha s(nT_s - \tau_n) + w_2(nT_s) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $T_s = 1/f_s$, f_s 为采样频率, τ_n 为经过采样之后的时延, 大小为 T_s 的整数倍。

广义二次互相关方法先计算源信号自相关和两信号的互相关, 然后计算两进行相关, 最后在频域进行加权, 得到的结果具有更尖锐的峰值, 最大值的位置即为所求的时延估计值 τ_n 。

1.4 相位估计修正

非整周期采样会出现频谱泄漏的现象从而导致相位估计出现误差, apFFT 具有相位不变性, 使用卷积窗对输入数据加权, 将数据叠加之后进行 FFT, 就可以得到 apFFT 频谱。

对于提取出的单频信号 x_1, x_2 , 可以由式(4)表示:

$$\begin{aligned} x_1(n) &= \sin(2\pi f_0 n T_s + \theta_1) \\ x_2(n) &= \alpha \sin(2\pi f_0 n T_s + \theta_2) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: θ_i 为信号的初始相位。

对 x_1 进行全相位傅里叶变换后:

$$Y_1(k) = \frac{\sin^2[(k_0 - k)\pi]}{\sin^2[(k_0 - k)\pi/M]} \frac{e^{j\theta_1}}{M^2} \quad (5)$$

式中: k 的取值范围为 $0 \leq k \leq N-1$; $k_0 = Nf_0/f_s$; M 为卷积窗长度。

此时峰值谱线的相位即为 x_1 的初相:

$$\theta_1 = \arg[Y(k)] \big|_{k=\max(|Y(k)|)} \quad (6)$$

计算出两信号的相位差即可对 1.3 节中的时延估计进行修正。

$$\Delta\tau = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2\pi f_0} \quad (7)$$

上述方法只能得到信号截取时的初相差, 为解决实际信号中由于噪声存在可能导致的相位偏移, 使用滑动时间窗截取信号, 计算一段时间内的相差的平均值, 可以有效的减小误差。图 3 为使用滑动时间窗取值平均的示意图, k 为时间窗宽, m 为每次移动的长度。

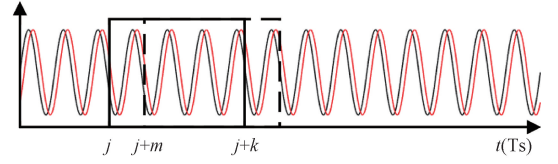


图 3 使用滑动时间窗截取信号

Fig. 3 The signal is intercepted using a sliding time window

对相位差取平均可得:

$$\tau_p = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta\tau_i}{V} \quad (8)$$

其中, V 为时间窗个数。结合式(4)和(9), 最终的时延估计值为:

$$\tau_{final} = \tau_n + \tau_p \quad (9)$$

2 数值仿真

2.1 单路信号模拟

模拟实验首先使用 5.12 MHz 采样频率生成总时长 0.5 s, 重采样频率为 51.2 kHz 的 3 种信号, 信号其他参数如表 1 所示。

表 1 3 种信号细节参数

Table 1 Detail parameters of the three signals

信号类型	参数
m 序列	15 阶序列, 带宽为 500 Hz ^[21]
啁啾信号	起始频率 1 000 Hz, 带宽 500 Hz
本文信号	起始频率 1 000 Hz, 带宽 500 Hz, $t_2 = 0.5$ s

本文信号添加的单频信号长度需考虑扬声器的前沿响应^[22]和滤波器的响应^[23]时间, 同时要保证有足够的长度能够时间平均以及广义互相关的可靠性, 选取的时间 $t_1 = 0.1$ s。

针对不同情况使用均方根误差 RMSE 或均方根百分误差 E_{mean} 评估时延估计效果, 使用相对标准差 σ_{RSD} 评估算法的稳定性。

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{Num}\right) \sum_{i=1}^{Num} (\tau_i - \tau)^2} \quad (10)$$

$$E_{rms} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{Num}\right) \sum_{i=1}^{Num} (\tau_i - \tau)^2}}{\tau} \times 100\% \quad (11)$$

$$\sigma_{RSD} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{Num}\right) \sum_{i=1}^{Num} (\tau_i - \tau_{\text{mean}})^2}}{\tau_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: τ_i 为估计值; τ 为实际值, 即设计时延; Num 为试验

次数; τ_{mean} 为时延估计均值。

图4为3种信号在不同信噪比下的性能表现,图中可看出本文提出的信号在传统仅使用广义互相关算法时表现基本一致,后续将用本文信号分别在不同重采样频率、不同环境噪声、不同时延3种条件下各进行2000组模拟,进行不同算法的性能比较。

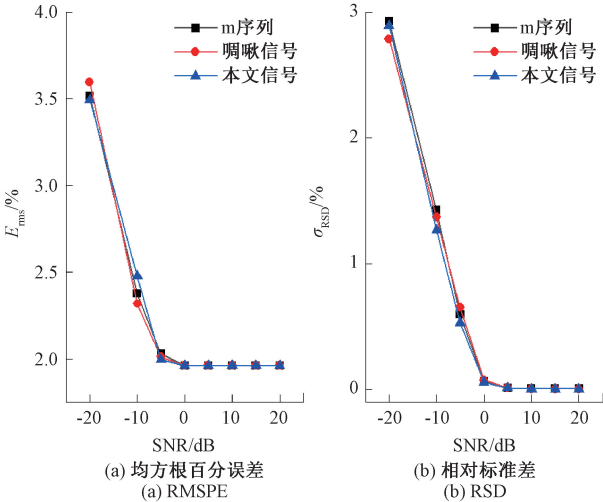


图4 不同信号的性能表现(重采样频率为51.2 kHz)
Fig.4 Performance of different signals (Resampling frequency: 51.2 kHz)

图5展示了在不同时延下3种方法的均方根百分误差,横坐标为以5.12 MHz为采样频率的采样间隔。在时延较小时,广义互相关算法的相对误差较大,插值算法在一定程度上能减小误差,但存在不稳定性。相比之下,本文提出的方法明显优于以上两者,其均方根百分误差在时延较小时仍低于0.1%,且误差相对稳定,不受采样间隔的限制。当时延为采样间隔的整数倍时,插值方法和

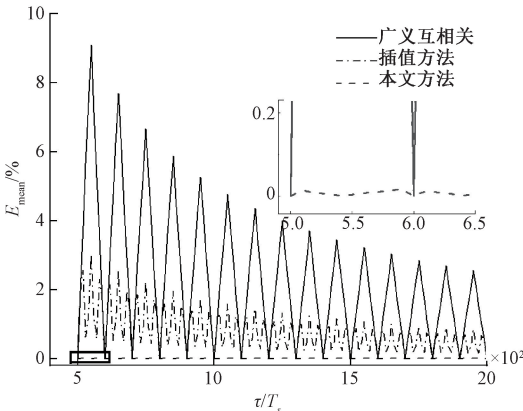


图5 不同时延下3种算法表现(重采样频率为51.2 kHz, SNR=20 dB)
Fig.5 Performance of three algorithms under different delay (Resampling frequency: 51.2 kHz, SNR=20 dB)

本文方法时延估计性能改善较小,在放大图中可以看到,3种方法此时的误差均为0%。

图6展示了在不同信噪比下的性能表现。当SNR>0 dB时,3种方法都趋于稳定,由于真实时延不是采样率的整数倍,广义互相关方法和插值方法估计的结果不会收敛到0。在-5<SNR<0 dB时,广义互相关方法出现估计错误的现象,此时误差小于起始频率的单个周期。相位估计在单个周期内的精度较高,本文方法同时使用了时间窗平均,可以修正广义互相关方法的估计误差。当SNR<-5 dB时,噪声中的单频分量严重影响相位估计,导致结果较差。因此,相对于广义互相关和插值方法,本文算法展现出了优秀的抗噪性能。

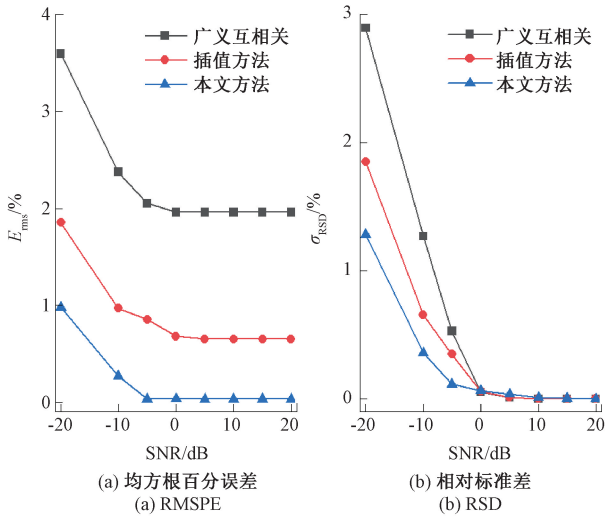


图6 不同信噪比下的性能表现(重采样频率为51.2 kHz)
Fig.6 Performance under different SNR (resampling frequency: 51.2 kHz)

使用不同的重采样频率进行仿真,为避免由非整数倍时延引起的趋势不明显的情况,本研究选择了一定距离内的均方根误差(RMSE)进行比较,如图7所示。3种方法的RMSE都随着采样频率的增加而降低,然而本文方法在受到采样频率的影响小于广义互相关方法和插值方法。对于本文方法,随着采样频率的提高,采样得到的信号逐渐接近连续信号,傅里叶变换点数可以取更大的值,相位估计更为精确。只要采样频率满足奈奎斯特采样定律,本文算法的RMSE也显著低于其他两种方法,因此可应用于低采样率环境。综合来说,使用本文算法对比广义互相关算法,可以将精度提高至多20倍以上。

2.2 多路信号模拟

锅炉中背景噪声较多集中于1000 Hz以下^[24],但高频声在其中衰减严重,导致实际可用带宽较窄,同时为避免二次谐波的影响,使用与2.1节中相同的参数生成起

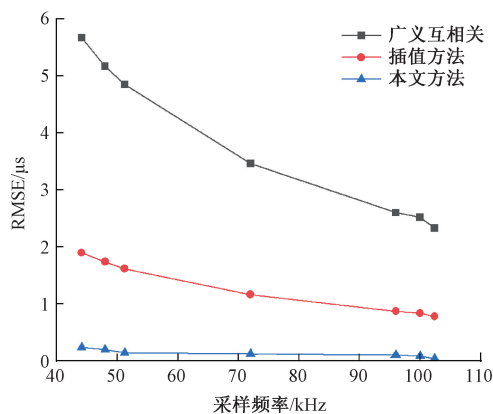


图 7 不同重采样频率下的性能表现 (SNR = 20 dB)

Fig. 7 Performance at different resampling frequencies (SNR = 20 dB)

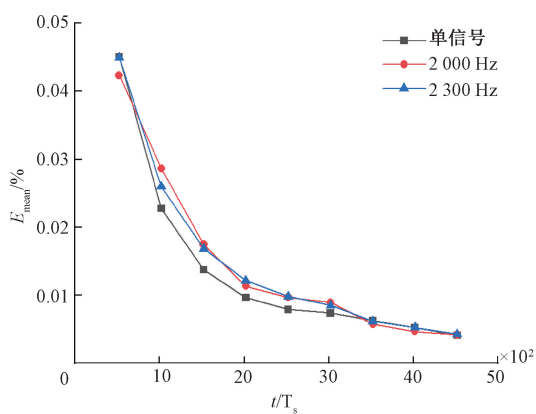


图 10 两路信号的误差表现

Fig. 10 Error performance of two signals

始频率分别为 2 000 Hz 和 2 300 Hz 的两路信号, 带宽设置为 250 Hz, 分别设置不同的时延, SNR = 10 dB, 信号功率谱密度如图 8、9 所示, 使用 2 000 Hz 的单路信号作为对比, 时延估计结果如图 10 所示。

3 实验验证

实验设置简图如图 11, 实际区域为 0.96 m × 0.96 m 的正方形区域, 每边两对扬声器和传声器分别放置在 1/3 和 2/3 处, 实验装置放置在半消声室中, 实验时气温为 19℃, 空气相对湿度为 43%。

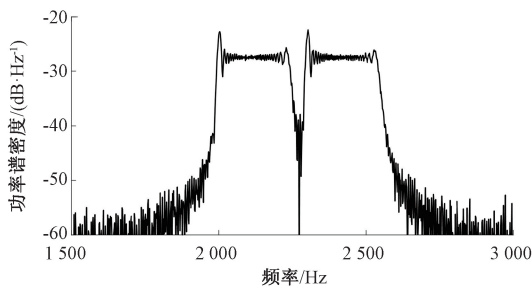


图 8 发射信号功率谱密度

Fig. 8 Power spectral density of transmitted signal

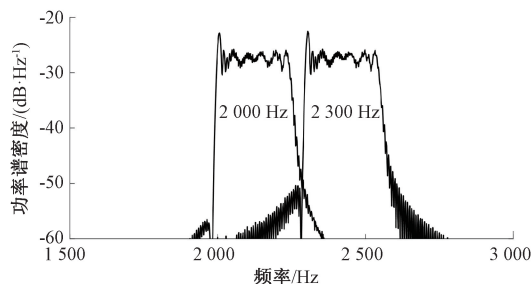


图 9 接收信号功率谱密度

Fig. 9 Power spectral density of received signal

如图所示, 使用带通滤波器可以很好的将两信号分离, 由图 10 可以看出, 本文方法都在多路信号同时存在的情况下准确的估计出时延, 且精度与单路信号时精度几乎一致, 因此, 本文方法适用于多路信号的同步时延估计。

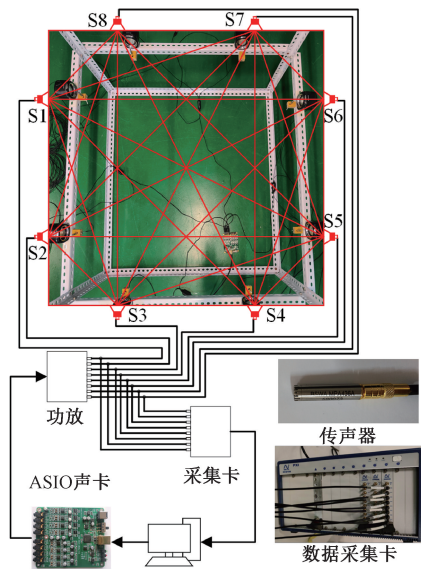


图 11 实验设置简图

Fig. 11 Experimental setup sketch

实验使用 4 Ω 3 W 的扬声器进行播放, 接收采集卡使用 ADLINK 9529, 传声器型号为 BSWA MPA436A, 采样率设置分别设置为 192、150、96、51.2 和 48 kHz。

3.1 单路时延估计

使用 2.1 节中生成的信号, 加载至扬声器 S1 播放, 传声器 S3~S8 负责接收, 进行 200 次实验, 背景噪声约

为 32 dB,无外加噪声时结果如图 12 所示。

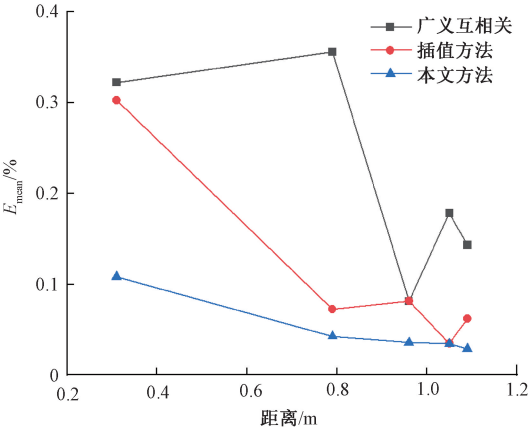


图 12 51.2 kHz 采样率下 3 种算法的性能表现
Fig. 12 Performance of three algorithms at 51.2 kHz

图 12 中可以看出,实际的时延经过时域采样后不一定是采样间隔的整数倍,导致广义互相关和插值方法的均方根百分误差会出现随距离变大的情况。本文算法可以实现高精度估计,在最近距离的误差仅为 0.12%,得到的结果相较于以上两种方法误差更小,稳定性更好。

为检验本文算法的抗噪性,使用扬声器 S2 播放高斯白噪声作为背景噪声。选取传声器 S6 处的结果展示如图 13 所示。

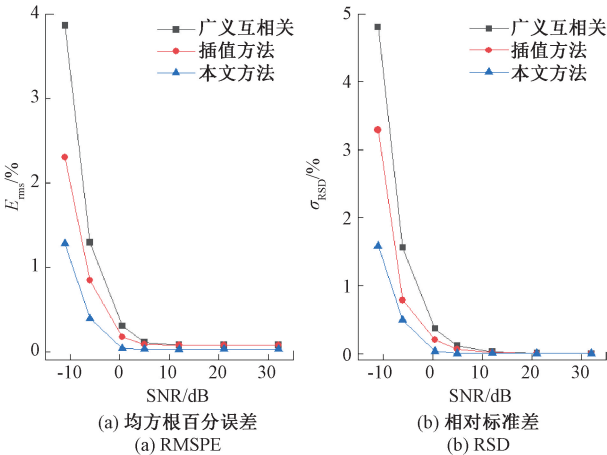


图 13 S6 处不同信噪比下的性能表现
Fig. 13 Performance of S6 under different SNR

图 13 中的采样频率为 51.2 kHz,通过室温下的声速计算 S1~S6 的时延约为 2.79 ms,转换为采样间隔约为 142.85 T_s ,无外加噪声时广义互相关结果均值为 143 T_s ,插值方法结果均值为 142.67 T_s ,两种方法的误差相等,在图中两方法收敛至同一值。当 SNR>5 dB 时,3 种方法都趋于稳定;当 SNR<0 时,噪声过大导致算法方差变大,但本文算法整体统计趋势仍低于广义互相关方法;当

0<SNR<5 时,噪声使得广义互相关算法出现波动,时延估计结果变差,本文算法在相位估计时可以消除影响,图 14 显示了广义互相关算法出现不稳定时,经过时移之后前部单频信号的状态,只取 100 个时间间隔。

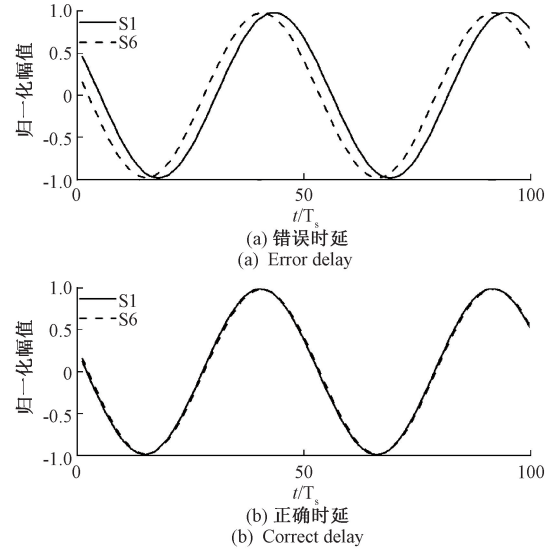


图 14 时移后的单频信号
Fig. 14 Single-frequency signal after time shift

图 15 为不同采样频率下接收信号的 RMSE,由于实验数据量小,从图中看出实验误差略大于模拟结果,但整体趋势与 2.1 节保持一致,本文方法在低采样率下精度依然有所保证。在实验中精度提升小于模拟结果,随采样频率提高逐渐降低,在常用的 51.2 kHz 采样频率下可以提升约 8.5 倍。

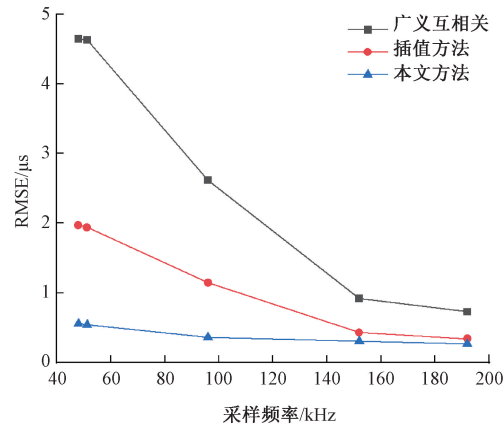


图 15 不同采样率下的性能表现
Fig. 15 Performance at different sampling rates

3.2 多路同步时延估计

实验采用 8 组信号,起始频率为从 2 000 开始每隔 300 Hz 作为一个信号,单个信号带宽为 250 Hz, $t_1=0.1$ s,

$t_2=0.4\text{ s}$,采样频率设置为 51.2 kHz 。

图 16 为发射信号的功率谱,即离扬声器最近的传声器接收到的功率谱密度,图 17 为传声器 S5 分离之后的功率谱密度。从图中可以看出,由于扬声器的方向性,与扬声器 S5 同侧的传声器 S6 接收到的功率谱密度最低,其他传声器都能看出信号前部正弦信号的功率大于后半部分。在进行时延估计时,不考虑与同侧的传声器之间的时延。

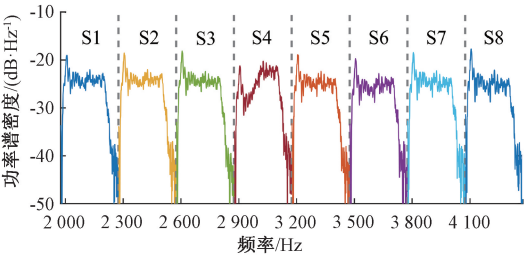


图 16 发射信号功率谱密度

Fig. 16 Power spectral density of transmitted signal

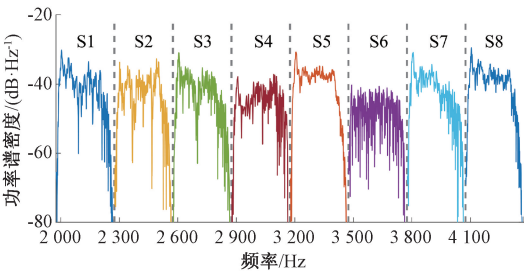


图 17 传声器 S5 经过带通滤波之后的功率谱密度

Fig. 17 Power spectral density of S5 after band-pass filtering

图 18 为传声器 S1 与 S4 分离出信号的时延结果图,结果与单信号对比差异不大,表 2 为所有路径下得到的误差,总体误差与 3.1 节中只存在单信号时一致,因此本文算法在多路同步环境中同样适用。同时,使用多路方法可以使单轮测量时间缩减为依次发声方法的 $1/8$ 。

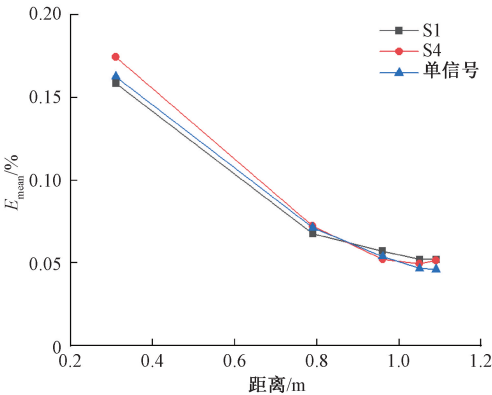


图 18 S1 和 S4 得到的结果

Fig. 18 S1 and S4 separate the delay result of the signal

表 2 所有路径的误差

Table 2 Error for all paths

路径	距离/m	E_{rms} /%	σ_{RSD} /%	路径	E_{rms} /%	σ_{RSD} /%
1-3	0.79	0.07	0.09	3-1	0.07	0.09
1-4	1.05	0.05	0.07	4-1	0.05	0.06
1-5	1.09	0.05	0.06	5-1	0.04	0.06
1-6	96	0.06	0.07	6-1	0.05	0.06
1-7	0.79	0.07	0.08	7-1	0.07	0.08
1-8	0.31	0.16	0.19	8-1	0.16	0.21
2-3	0.31	0.15	0.22	3-2	0.18	0.22
2-4	0.79	0.07	0.08	4-2	0.07	0.08
2-5	0.96	0.06	0.07	5-2	0.06	0.06
2-6	1.09	0.05	0.06	6-2	0.05	0.06
2-7	1.05	0.05	0.06	7-2	0.05	0.06
2-8	0.79	0.07	0.08	8-2	0.07	0.09
3-5	0.79	0.06	0.09	5-3	0.06	0.09
3-6	1.05	0.05	0.06	6-3	0.05	0.06
3-7	1.09	0.05	0.06	7-3	0.05	0.06
3-8	0.96	0.06	0.07	8-3	0.06	0.07
4-5	0.31	0.16	0.22	5-4	0.17	0.24
4-6	0.79	0.07	0.09	6-4	0.06	0.09
4-7	0.96	0.06	0.08	7-4	0.05	0.07
4-8	1.09	0.05	0.06	8-4	0.05	0.07
5-7	0.79	0.08	0.08	7-5	0.07	0.09
5-8	1.05	0.05	0.06	8-5	0.05	0.07
6-7	0.31	0.17	0.21	7-6	0.18	0.21
6-8	0.79	0.07	0.08	8-6	0.07	0.09

4 结 论

针对声学测温中时延估计精度有限的问题,本文提出了一种带导频的线性调频信号进行相位补偿来提升时延估计精度的算法,分别对单路和多路信号的时延估计进行了仿真和实验验证。结果表明,本文提出的信号在使用广义互相关方法时精度与常用的信号一致;加入相位补偿后,本文算法精度更高,最低可以提升 8.5 倍以上,稳定性和抗噪声性能更强,精度受采样率影响较小,可以应用在采样率首先的环境;在多路信号同时发声时精度和单路发声时精度相当,可以大幅提升声学测温中时延估计的速度和精度。

本文提出的信号和方法具有广泛适用性,可应用于

几乎所有声学测温 and 测流场景。在当前的测温技术中采用本文方法能够显著提升测量精度。

参考文献

- [1] YU Y, XIONG Q Y, YE ZH SH, et al. A review on acoustic reconstruction of temperature profiles: From time measurement to reconstruction algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 4505924,1-24.
- [2] ZHANG W, JIANG G SH, SUN J H, et al. 3D reconstruction of nonuniform and unsteady flow velocity distribution using nonlinear acoustic ray tracing and tomography[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 217: 124660,1-20.
- [3] KONG Q, LU Y, JIANG G SH, et al. Acoustic measurement of velocity filed using improved radial basic function neural network[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 202: 123733,1-18.
- [4] LIU Q, ZHOU B, ZHANG J, et al. A novel time-of-flight estimation method of acoustic signals for temperature and velocity measurement of gas medium[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 140: 110759.
- [5] 余萍, 杨乘, 王紫薇, 等. 基于联合加权的广义二次相关时延估计算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 400-404.
YU P, YANG CH, WANG Z W, et al. Generalized secondary correlation delay estimation algorithm based on joint weighting[J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 400-404.
- [6] 王明吉, 陈春雨, 史建峰. 基于相位比较的测量声波飞渡时间的研究[J]. 大庆师范学院学报, 2017, 37(6): 21-24.
WANG M J, CHEN CH Y, SHI J F. Research on the measurement of sonic transit time based on phase comparison[J]. Journal of Daqing Normal University, 2017, 37(6): 21-24.
- [7] JACKSON J C, SUMMAN R, DOBIE G I, et al. Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2013, 60(2): 343-355.
- [8] LIU Q, ZHOU B, CHENG R X, et al. High temporal resolution pyrometry and velocimetry based on acoustic frequency division multiplexing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 6500511,1-11.
- [9] LIU Q, ZHOU B, CHENG R X, et al. Online monitoring instantaneous 2D temperature distributions in a furnace using acoustic tomography based on frequency division multiplexing[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 48: 103176.
- [10] 唐林锋, 陈从颜. 面向炉膛温度场的时延估计改进算法[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(9): 36-38, 40.
TANG L F, CHEN C Y. Improved algorithm of time delay estimation for furnace temperature field [J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(9): 36-38, 40.
- [11] LU J, ZHANG Q, SHI W, et al. High accuracy phase-matching delay estimation method based on phase correction[J]. Electronics Letters, 2020, 56(9): 456-459.
- [12] 丁超, 陈喆, 张宗堂, 等. 一种互谱相位在时延估计中的应用方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 803-808.
DING CH, CHEN ZH, ZHANG Z T, et al. Time delay estimation using cross-power spectrum phase[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(3): 803-808.
- [13] 扈景召, 王文政, 杜丹. 一种高精度相位时延方法的仿真及实现[J]. 电子质量, 2022(8): 187-192.
HU J ZH, WANG W ZH, DU D. Simulation and implementation of a high precision phase delay method[J]. Electronics Quality, 2022(8): 187-192.
- [14] 沈廷鳌, 涂亚庆, 刘翔宇, 等. 基于相关原理的非整周期信号相位差测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2153-2160.
SHEN T AO, TU Y Q, LIU X Y, et al. Research on phase difference measurement for non-integer period sampling signal based on correlation theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2153-2160.
- [15] 黄翔东, 王兆华. 全相位 FFT 相位测量法的抗噪性能[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 286-291.
HUANG X D, WANG ZH H. Anti-noise performance of all-phase FFT phase measuring method [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011, 26(3): 286-291.
- [16] 路伟涛, 任天鹏, 陈略, 等. 一种基于频移补偿的 apFFT 相位估计改进方法及应用 [J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 27-34.
LU W T, REN T P, CHEN L, et al. An improved apFFT phase estimation method based on frequency compensation and its application in deep space exploration [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 27-34.
- [17] JIANG J J, DANG W J, DUAN F J, et al. An accurate ultrasonic wind speed and direction measuring method by combining time-difference and phase-difference measurement using coded pulses combination [J].

Applied Acoustics, 2020, 159: 107093, 1-8.

- [18] LEE T J, CHANG H H, CHAO C H. High bandwidth efficiency FPGA-based underwater acoustic transceiver with adaptive-SFDR DDFS [C]. 2023 20th International SoC Design Conference (ISOCC). IEEE, 2023: 39-40.
- [19] 张俊平. 扬声器的互调失真测试分析探究[J]. 电声技术, 2022, 46(4): 54-58.
- ZHANG J P. Analysis and exploration of intermodulation distortion test of loudspeaker [J]. Audio Engineering, 2022, 46(4): 54-58.
- [20] 乔厚财, 刘光祖, 邹骏, 等. 基于 DFT 的 OFDM 无线通信系统信道估计算法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(1): 152-156, 162.
- QIAO H C, LIU G Z, ZOU J, et al. Research on channel estimation algorithm of OFDM wireless communication system based on DFT [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(1): 152-156, 162.
- [21] 郭军, 高文静, 蔡国斌, 等. 基于伪随机序列的松散煤体声学测温方法及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 123-131.
- GUO J, GAO W J, CAI G B, et al. Acoustic temperature measurement of loose coals based on pseudo-random sequences and application research [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 123-131.
- [22] 张平柯. 扬声器对低频短纯音信号响应的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2274-2281.
- ZHANG P K. Loudspeakers' response to low-frequency tone burst signals [J]. Journal of Central South University, 2010, 41(6): 2274-2281.
- [23] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- HU G SH. Digital Signal Processing: Theory, algorithm and implementation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [24] ZHANG SH P, SHEN G Q, AN L S, et al. Online monitoring of the two-dimensional temperature field in a boiler furnace based on acoustic computed tomography [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 958-966.

作者简介



孙建浩, 2018 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学博士研究生, 主要研究方向为炉内多场协同测量和设备开发。

E-mail: sunjh@ncepu.edu.cn

Sun Jianhao received his B. Sc. degree in 2018 from North China Electric Power

University. He is currently a Ph. D. candidate at North China Electric Power University. His main research interests are multi-field synergistic measurements and equipment development in



姜根山(通信作者), 1983 年于华北电力大学获得学士学位, 1989 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2006 年于华北电力大学获得博士学位, 现为华北电力大学数理学院教授, 主要研究方向为炉内声学理论。

E-mail: gsjiang@ncepu.edu.cn

Jiang Genshan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 1983, received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1989, and received his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2006. He is currently a professor at North China Electric Power University. His main research interest is acoustic method in boiler.



张伟, 2015 年于华北电力大学获得学士学位, 2018 年于华北电力大学获得硕士学位, 现为华北电力大学博士研究生, 主要研究方向为声层析成像、智慧锅炉声学测量系统。

E-mail: zhangwei_7k@163.com

Zhang Wei received his B. Sc. degree in 2015 from North China Electric Power University, received his M. Sc. degree in 2018 from North China Electric Power University. He is currently a Ph. D. candidate at North China Electric Power University. His main research interests are Nonlinear acoustic tomography, smart boiler acoustic measurement system.



姜羽, 2018 年于渤海大学获得学士学位, 2021 年于华北电力大学获得硕士学位, 现为华北电力大学博士研究生, 主要研究方向为蒸汽发生器管道泄漏检测与定位。

E-mail: jiangyu199605@163.com

Jiang Yu received her B. Sc. degree in 2018 from BoHai University, received her M. Sc. degree in 2021 from North China Electric Power University. She is currently a Ph. D. candidate at North China Electric Power University. Her main research interests are leakage detection and localization of steam generator piping.



刘月超, 2010 年于河北大学获得学士学位, 2014 年于华北电力大学获得硕士学位, 2019 年于华北电力大学获得博士学位, 现为华北电力大学数理系讲师, 主要研究方向为声学的非线性效应。

E-mail: liuyuechao@ncepu.edu.cn

Liu Yuechao received his B. Sc. degree from Hebei University in 2010, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from North China Electric Power University in 2014 and 2019, respectively. He is currently a lecture at North China Electric Power University. His main research interest is acoustic nonlinear effects.