

引用格式: 郭培培, 李建良. 音频无人机定位的时延估计模拟分析[J]. 声学技术, 2020, 39(5): 650-654. [GUO Peipei, LI Jianliang. Simulation analysis of time delay estimation in audio unmanned aerial vehicle location[J]. Technical Acoustics, 39(5): 650-654.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.05.021

音频无人机定位的时延估计模拟分析

郭培培, 李建良

(南京理工大学, 江苏南京 210094)

摘要: 针对无人机非平稳音频信号时差定位中, 广义互相关时延估计算法抗噪性差和时延估计精度低等问题, 文章采用了一种基于广义二次相关时延估计的改进算法。算法对叠加了实际噪声(如风声、雨声、汽车鸣笛声等)的无人机音频信号进行频谱细化的广义二次相关, 有效抑制了噪声干扰, 融合相关峰精确插值算法, 提高了互相关函数的分辨率, 使得时延峰值更加明显。仿真实验结果表明, 改进的广义二次相关方法在不同信噪比时, 比广义互相关和广义二次相关算法的时延估计精度更高, 稳定性更好。改进的广义二次相关算法对无人机定位中的时延估计具有更好的性能优势, 具有较强的实际应用性。

关键词: 无人机音频; 时延估计; 广义互相关; 广义二次相关; 相关峰精确插值算法

中图分类号: TN912

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-05-0650-05

Simulation analysis of time delay estimation in audio unmanned aerial vehicle location

GUO Peipei, LI Jianliang

(School of Science/Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor noise immunity and low estimation accuracy of generalized cross-correlation time delay estimation algorithm in time-difference localization of non-stationary audio signals of unmanned aerial vehicle (UAV), an improved algorithm based on generalized quadratic correlation time delay estimation is adopted in this paper. The algorithm performs generalized quadratic correlation on audio signal with actual noise (such as wind sound, rain sound, car whistle sound, etc.), effectively suppresses noise interference and integrates the fine interpolation of correlation peak (FICP) algorithm to improve the resolution of cross-correlation function, which makes the peak delay more obvious. The simulation results show that the improved generalized quadratic correlation estimation method has higher accuracy of time delay estimation and better stability than the generalized cross-correlation and generalized quadratic correlation algorithms under different signal-to-noise ratios. The improved generalized quadratic correlation algorithm has better performance advantages for time delay estimation in UAV positioning, and has strong practical application.

Key words: UAV audio; delay estimation; generalized cross correlation; generalized quadratic correlation; fine interpolation of correlation peak (FICP) algorithm

0 引言

对无人机进行定位的技术手段有很多, 如雷达、无线通讯、视频等。通过声源对目标定位作为对无人机探测的补充手段, 声源定位系统自身不产生声波, 具有很强的隐蔽性。在声源定位应用中, 典型方法是时差声源定位法, 基于时延估计的方法是指利用声源发出的信号到达各个传声器的时间

延迟对声源位置进行估计, 该方法计算复杂度低, 实时性高, 且硬件实现成本较低, 因而得到了广泛应用。时延估计作为时差声源定位的关键第一步, 时延的微小误差都会导致定位结果的偏差^[1]。广义互相关是时延估计最常用的一种方法, 通过对相位变换加权函数(Phase Transform, PHAT)加权进行改进^[2], 提高了时延估计的准确率。然而广义互相关算法易受环境噪声的影响, 文献[3]提出将接收到的信号先进行奇异值分解处理, 再对降噪后的互功率谱引入奇异值分解(Hassab Boucher, HB)加权函数, 锐化互相关函数的峰值。基于三次相关的时延估计算法^[4]利用两路信号的自相关与互相关功率谱函数做互相关, 使三次相关的功率谱函数幅值呈指数倍

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-18

作者简介: 郭培培(1992—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为声音的定位与跟踪。

通讯作者: 郭培培, E-mail: g2015806435@163.com

增长，有效地提取时延估计值。

1 广义互相关与二次相关算法

传统互相关时延估计方法是通过互相关函数的峰值来得到延迟时间差值^[5-6]。然而，由于实际中噪声和混响的影响，互相关函数峰值不明显，甚至出现伪峰值，造成估计误差。为降低噪声对时延估计的影响，Knapp 和 Carter 提出了广义互相关(Generalized Cross Correlation, GCC)时延估计算法^[7]。假设两个麦克风接收到的音频信号分别为 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ ，对应的傅里叶变换为 $X_1(\omega)$ 和 $X_2(\omega)$ ，则信号 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的互功率谱为

$$G_{12}(\omega) = X_1(\omega) X_2^*(\omega) \quad (1)$$

由于接收信号包含环境噪声，广义互相关法在求出两信号的互功率谱后，再用加权函数进行加权处理，以增强声源信号，削弱噪声的影响。则广义互相关函数为

$$R_{12}(\tau) = \int_0^\pi \psi_{12}(\omega) G_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

其中： $\psi_{12}(\omega)$ 是加权函数，该算法采用的加权函数为 PHAT 加权函数，表达式为

$$\psi_{12}(\omega) = \frac{1}{|G_{12}(\omega)|} \quad (3)$$

在传统的广义互相关时延估计算法的基础上，广义二次相关算法是对两路信号先进行自相关和互相关运算^[8-11]，再将得到的自相关和互相关函数进行相关运算，提升信号信噪比和分辨力。

信号 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的互功率谱为 $G_{12}(\omega)$ ， $x_1(n)$ 的自功率谱为 $G_{11}(\omega)$ ，则广义二次相关函数为

$$R_{12}(\tau) = \int_0^\pi \psi_{12}(\omega) G_{12}(\omega) G_{11}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4)$$

为使算法更适用于实际应用，提高算法稳定性非常重要。而广义互相关与广义二次相关算法时延估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)值的波动性较大，因此本文提出改进的广义二次相关算法。

2 改进的广义二次互相关算法

广义二次相关虽然可以提高抗噪声性能，但它一般利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)计算原始信号 x_1 、 x_2 的互功率谱，由于 FFT 的栅栏效应，得到的时延值总是采样间隔的整数

倍，造成了时延估计误差。改进的广义二次互相关算法用改进的 Z 变换算法(Modified Chirp Z Transform, MCZT)代替 FFT，计算无人机音频信号 x_1 、 x_2 的细化频谱提高频谱精度。为了提高相关函数的分辨率，对二次相关函数进行相关峰精确插值算法(Fine Interpolation of Correlation Peak, FICP)^[12-15]，提高相关峰的检测精度，同时抑制噪声对时延估计的影响，再添加改进后的加权函数，大大提高了时延估计精度。FICP 只计算峰值附近的一段相关函数，它得到的波形是 FFT 法得到相关峰波形的“放大”，相关峰附近的分辨率提高，使得时延估计精度更高。

对于信号 $x_1(n)$ ， $x_2(n)$ ， $n=0,1,\dots,N-1$ ，MZCT 算法的定义式为

$$X(k) = \text{MCZT}(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j\frac{2\pi kn}{N_1}\right), \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

加窗函数 $w(n)$ ， $n=0,1,\dots,N-1$ 后，通过 MCZT 算法得到对应的 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ ，根据频谱的对称性，复数的共扼相乘等于相乘后的共扼，得到相关函数的谱，对其补零，并将互谱拉长为 N_2 ($N_2 \geq N_1$)，再经过 FICP 快速算法可得：

$$R_{n_1} = \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N-1} R(k) \exp(j\frac{2\pi kn}{N_2}) + \frac{1}{N_2} \text{IMCZT}[R_3(k)] \exp(-j\frac{2\pi Nn}{N_2}), \quad n=1,2,\dots,N-1 \quad (6)$$

$$R_{n_2}(n) = R_{n_2}(N_2 - N + n) = \frac{1}{N_2} [\text{IMCZT}[H(k)] + Q(n-1) \text{IMCZT}[M(k)]] \quad (7)$$

$$Q(n) = \exp\left[j\frac{2\pi}{N_2}(N^2 - nN)\right], \quad n=0,1,\dots,N-1, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (8)$$

$$H(k) = R_1(k) \exp\left(j\frac{2\pi kN}{N_2}\right) \quad (9)$$

$$M(k) = R_3(k) \exp\left(j\frac{2\pi}{N_2}kN\right) \quad (10)$$

式(6)、(7)中 IMCZT 运算表示 MCZT 的逆运算。由 $R_{n_1}(n)$ 和 $R_{n_2}(n)$ 可以组合出相关函数：

$$\begin{cases} R_n(n) = R_{n_2}(N+n), & n=-N,\dots,-1 \\ R_n(n) = R_{n_1}(n), & n=0,1,\dots,N-1 \end{cases} \quad (11)$$

通过采用 Daniel V. Rabinkin 提出的相位变换加权算法对该算法的权函数进行改进，称为修正的互功率谱相位算法：

$$\phi_{\text{M-CSP}} = \frac{1}{|G_{12}(\omega)|^\rho}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (12)$$

其中： ρ 的取值与噪声特性和声学反射特性有关。

3 实验仿真与结果分析

3.1 实验样本

四旋翼和固定翼无人机是典型的民用无人机，选取四旋翼大疆精灵 3 和大疆悟无人机的无噪声音频作为实验原始信号，固定翼无人机同理。通过麦克风采集的无人机音频信号采样频率为 44 100 Hz，音频信号长度为 1 s。由于无人机音频信号的非平稳性和时效性，实验在 Windows10 系统下采用 Matlab2014 软件对获取的信号进行归一化和分帧，帧长为 30 ms。在不同 ρ 值条件下进行 100 次时延估计实验，当 ρ 值为 0.9 时，时延估计的准确率最高。所以本文中 ρ 的取值为 0.9。对于实际的外界环境，通常伴随着实际噪声的影响，本文利用 CoolEdit 软件将原始信号加入实际飞机滑行声、惊雷声、音乐、大雨声、汽车喇叭声、海浪和风吹树叶声，得到模拟无人机含噪音频信号，其中两种类型无人机带噪音频信号的信噪比如表 1 所示。信噪比可表示为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{n=0}^{N-1} s^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - s(n)]^2} \quad (13)$$

式中： $\sum_{n=0}^{N-1} s^2(n)$ 表示纯净音频信号的能量， $x(n)$ 表示带噪音频信号。

表 1 两种类型无人机带噪音频信号的信噪比
Table 1 SNR ratios of audio signal mixing noise for two types of UAVs

加入噪声类型	带噪音频信号信噪比/dB	
	精灵 3 型无人机	悟型无人机
飞机滑行声	-8.17	-9.19
惊雷声	-5.68	-6.38
音乐	0.24	0.07
大雨声	3.09	4.95
汽车喇叭声	7.72	9.17
海浪声	12.09	13.34
风吹树叶声	16.86	18.04

3.2 准确率与稳定性

本文选取时延估计值的正确率和稳定性来评价时延估计时延估计的性能，对于稳定性分析采用 RMSE 方法，表示为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t)^2} \quad (14)$$

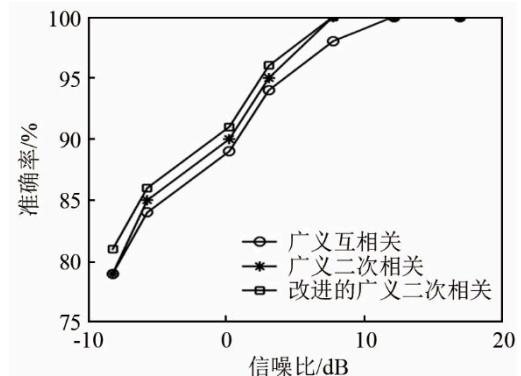
其中： i 表示第 i 次实验， n 表示实验总次数， t_i 表

示第 i 次实验的时延估计值， t 表示时延准确值。

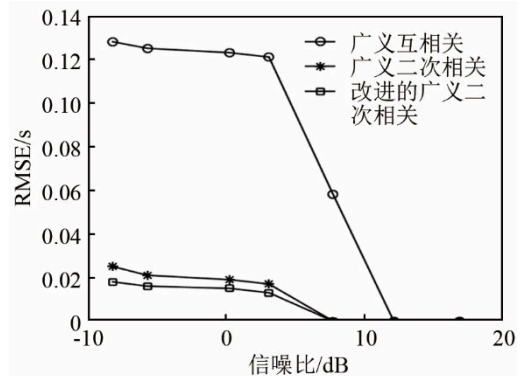
对两种类型的无人机带噪音频信号分别采用广义互相关、广义二次相关法和改进的广义二次互相关进行 100 次时延估计实验，得到不同噪声条件下评价时延估计性能准确率及均方根误差变化曲线，如图 1、图 2 所示。

图 1(a)、2(a)反映了大疆精灵 3 和大疆悟在不同信噪比情况时，3 种不同时延估计算法得到的估计值的正确率。显然广义互相关的时延估计的正确率明显低于其他两种算法。随着信噪比上升，3 种算法的时延估计准确率都在提高，改进的广义二次相关的正确率始终高于其他两种算法；信噪比较低时，信号受到噪声影响变大，但广义二次相关和改进的广义二次相关相比于广义互相关，准确率仍然较高，说明广义二次相关具有更好的抗噪性能。

图 1(b)、2(b)反映了大疆精灵 3 和大疆悟在不同信噪比情况时，3 种不同时延估计算法得到的估计值的 RMSE 值。明显地，改进的广义二次相关算法 RMSE 值最小，并且随着信噪比降低上升趋势相对平缓，比另外两种算法具有更好的时延估计平稳性能。在高信噪比情况下，广义互相关和改进的广



(a) 时延估计的准确率



(b) 时延估计的稳定性

图 1 大疆 Phantom 3 型无人机在不同信噪比下不同时延估计算法的准确率和 RMSE 值

Fig.1 The accuracy rates and RMSE values of different time delay estimation algorithms under different signal-to-noise ratios for Phantom 3 UAV

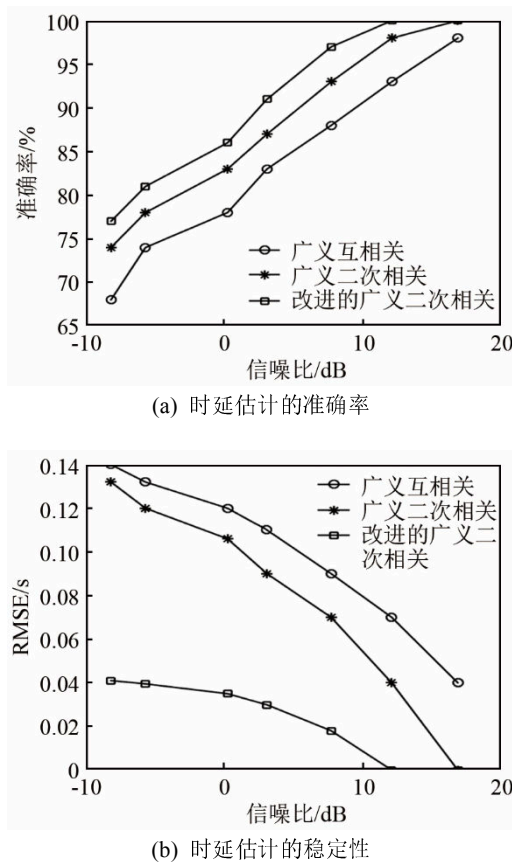


图 2 大疆 Inspire 型无人机在不同信噪比下不同时延估计算法的准确率和 RMSE 值

Fig.2 The accuracy rates and RMSE values of different time delay estimation algorithms under different signal-to-noise ratios for Inspire UAV

义二次相关算法的估值能力相差不大，时延估计值的 RMSE 值较小且波动性低；当信噪比较低时，广义互相关算法的 RMSE 值明显大于另两种算法。且随着信噪比的降低，3 种算法的时延估计偏离程度逐渐增大，与改进的广义互相关算法相比，广义互相关和广义二次相关的时延估计性能较差。

3.3 算法用时

为进一步验证所提算法的时延估计的有效性，实验在 Windows10 环境下，采用 Matlab2014 对两种型号的无人机用 3 种不同时延估计算法进行 100 次仿真实验，不同时延估计算法的平均算法用时仿真运行结果如表 2 所示。

从表 2 的运行结果可以看出，不同的时延估计算法估计时延的时间是不同的。相同信号长度的时延估计中，广义互相关和广义二次相关算法运行时间较短，改进的广义二次相关算法运行时间最长，相比于前两种算法改进算法运行时间增加了 8 倍。由于四旋翼无人机最高时速可达 60~72 km·h⁻¹，要求时延估计算法 CPU 运行时间不超过 0.2 s，定位误差 3~4 m，对于无人机的时延估计，3 种算法的

算法用时能够满足要求。综合考虑，改进的广义二次相关算法更适合对无人机音频信号进行时延估计，准确性高，抗噪性能和实用性更强。

表 2 两种类型无人机采用不同时延估计算法运行的算法用时仿真结果

Table 2 Time-consuming simulation results of different delay estimation algorithms for the two types of UAVs

无人机类型	时延估计算法	平均算法用时/(10 ⁻² s)
大疆精灵 Phantom 3	广义互相关	1.877 0
	广义二次相关	1.899 0
	改进的广义二次相关	15.643 0
大疆悟 Inspire	广义互相关	1.897 8
	广义二次相关	1.890 6
	改进的广义二次相关	15.504 9

4 结论

本文在广义互相关算法的基础上，利用广义二次相关抗噪性强，频谱细化使相关波形更光滑，FICP 提高相关函数的分辨率的优势，提出了针对非平稳的无人机音频信号进行时延估计的改进算法。通过对三种算法的时延估计性能比较分析，改进的广义二次相关算法性能优势明显高于广义二次相关算法和广义互相关算法，显著提高了时延估计的准确性、抗噪性能以及稳定性。改进的广义二次相关算法的主要目的是针对无人机飞行速度的特点，在算法满足精度和实时性要求的前提下，使最后的系统集成时所采用的关键算法能具更广泛的适用性，以利于应对更复杂的实际应用环境或噪声干扰。将此方法用于无人机音频信号的时延估计，易于实现，且对基于时延估计的无人机定位与追踪等具有一定的应用价值和参考价值。

对于无人机的定位和跟踪问题，由于涉及多麦克风阵型(立体三角、不同四元等)结构、不同数学模型、定位跟踪算法以及精度的辅助校正系统等，限于篇幅我们将另文讨论。

参 考 文 献

[1] 张雷岳, 张兴敢, 刘超. 麦克风阵列声源定位中时延估计的改进[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(1): 25-30.
ZHANG Leiyue, ZHANG Xinggan, LIU Chao. The improvement of time delay estimation in the microphone array sound localization system[J]. Journal of Nanjing University Natural Science, 2015, 51(1): 25-30.

[2] 张宇, 严天峰. 基于广义二次相关的稀疏傅里叶变换时延估计算法[J]. 电光与控制, 2019, 26(3): 54-58.
ZHANG Yu, YAN Tianfeng. Sparse Fourier Transform time delay estimation based on generalized quadratic correlation[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3): 54-58.

- [3] 齐小刚, 袁列萍, 刘立芳. 奇异值分解的 HB 加权广义互相关时延估计[J]. 信号处理, 2018, **34**(10): 1160-1168.
QI Xiaogang, YUAN Lieping, LIU Lifang. HB-weighted generalized cross-correlation time delay estimation for singular value decomposition[J]. Signal Processing, 2018, **34**(10): 1160-1168.
- [4] 何伟杰, 严天峰, 张宇. 基于三次相关的时延估计算法[J]. 兰州交通大学学报, 2019, **38**(1): 66-72.
HE Weijie, YAN Tianfeng, ZHANG Yu. Time delay estimation algorithm based on cubic correlation[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, **38**(1): 66-72.
- [5] PAN J J, BASTARD C L, WANG Y D, et al. Time delay estimation using ground-penetrating radar with a support vector regression-based linear prediction method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, **56**(5): 2833-2840.
- [6] POURMOHAMMAD A, AHADI S M. Dimensional N-microphone sound source localization[J]. EURASIP Journal on Audio, Speech and Music Processing, 2013(1): 27-29.
- [7] KNAPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on ASSP, 1976, **24**(4): 320-327.
- [8] 刘敏, 曾毓敏, 张铭. 基于二次相关的语音信号时延估计改进算法[J]. 应用声学, 2016, **35**(3): 255-264.
LIU Min, ZENG Yumin, ZHANG Ming. An improved speech signal delay estimation algorithm based on quadratic correlation[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, **35**(3): 255-264.
- [9] 茅惠达, 张玲华. 声源定位中广义互相关时延估计算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, **52**(22): 138-142.
MAO Huida, ZHANG Linghua. Research on generalized cross-correlation time delay estimation algorithms for source location[J]. Computer Engineering and Application, 2016, **52**(22): 138-142.
- [10] LEE J Y, CHANG P H, JIN M L. Adaptive integral sliding mode control with time delay estimation for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, **64**(8): 6796-6804.
- [11] 张大威, 鲍长春, 夏丙寅. 复杂环境下基于时延估计的声源定位技术研究[J]. 通信学报, 2014, **35**(1): 183-190.
ZHANG Dawei, BAO Changchun, XIA Bingyan. Research on sound source location technology based on time delay estimation in complex environment[J]. Journal of Communications, 2014, **35**(1): 183-190.
- [12] 韩洁, 吴长奇. 相关峰插值的二次相关锐化时延估计方法[J]. 信号处理, 2014, **30**(10): 1241-1244.
HAN Jie, WU Changqi. Quadratic correlation sharpening time delay estimation method based on correlation peak interpolation[J]. Signal Processing, 2014, **30**(10): 1241-1244.
- [13] 杨亦春, 李晓东, 马驰州. 相关峰细化的精确时延估计快速算法研究[J]. 声学学报, 2003, **28**(2): 150-166.
YANG Yichun, LI Xiaodong, MA Chizhou. Research on fast algorithms for accurate time delay estimation with relevant peak refinement[J]. Journal of Acoustics, 2003, **28**(2): 150-166.
- [14] 杜娟, 程雷. 基于二次相关的时延估计方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, **30**(6): 221-223.
DU Juan, CHENG Lei. Time-delay estimation based on second correlation [J]. J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, **30**(6): 221-223.
- [15] 金留念. 基于二次相关的时延估计方法研究[J]. 电子信息对抗技术, 2011, **26**(1): 39-41.
JIN Liunian. Research on time delay estimation method based on quadratic correlation[J]. Electronic Information Countermeasure Technology, 2011, **26**(1): 39-41.