

基于 MUSIC 功率谱估计的直升机空中信号分析

李 玲, 杜 鹏

(水下测控技术国家重点实验室, 辽宁大连 116013)

摘要: 针对直升机飞行的辐射噪声特征谱线进行分析, 提出一种基于 MUSIC 算法的直升机声信号处理方法。首先阐述 MUSIC 谱估计方法, 然后针对实测不同机型直升机的飞行辐射噪声数据, 分别进行 MUSIC 算法和传统方法的频谱分析, 对得到的结果进行分析比较, 数据处理结果表明 MUSIC 算法能够抑制噪声, 明显改善信噪比, 并能够更为细致地体现直升机声信号的谐波特性。

关键词: 直升机声信号; 目标线谱; MUSIC 算法

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-05-0499-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.05.017

Analysis of helicopter radiated signal based on MUSIC spectrum estimation

LI Ling, DU Peng

(Scientific and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, Liaoning, China)

Abstract: A method based on multiple signal classification(MUSIC)algorithm is proposed to process the helicopter radiated acoustic signal with random noise under the condition of the assumption that is the signal and noise are mutually uncorrelated. This paper introduces the MUSIC spectrum estimation method, and then uses the traditional method and MUSIC algorithm to process the signals radiated by different types of helicopters. The results show that MUSIC spectrum estimation can suppress the noise, extrude the peak of spectrum to improve signal to noise ratio obviously and reflect the harmonic characteristics of helicopter acoustic signal accurately.

Key words: helicopter acoustic signal; target line spectrum; MUSIC algorithm

0 引言

在现代战争中, 直升机在反潜、侦察及巡逻等方面发挥着举足轻重的作用, 尤其在低空飞行条件下, 能够躲避雷达的探测, 对地面目标的威胁大大增加。通过获取其被动辐射噪声的方法来解决低空飞行目标的探测问题, 国内外学者采用快速傅里叶变换和高阶谱的方法实现对直升机辐射噪声信号的分析。但是对于信号中混有不相关的随机噪声, 消噪效果不是很理想, 本文提出基于 MUSIC 功率谱估计的直升机空中信号分析方法。

MUSIC 谱估计是数字信号处理中十分重要的研究领域, 人们先后提出了各种谱估计的理论和方法, MUSIC 谱估计能够将特征线谱提取出来, 在信号处理方面的多个领域得到广泛应用。MUSIC 谱估计方法的基本思想是对所估计的信号相关矩阵函

数进行特征分解, 分别生成信号子空间和噪声子空间, 利用信号子空间和噪声子空间的正交性, 构造空间谱函数, 从而进行谱峰搜索来估计信号频率。

本文首先详细介绍 MUSIC 谱估计方法, 然后针对获取到的不同机型直升机的辐射噪声数据分别进行 MUSIC 算法和传统 FFT 的频谱分析, 对得到的结果进行分析比较, 其结果表明, 基于 MUSIC 功率谱估计算法能够明显改善信噪比, 并能够更为细致地体现直升机声信号的谐波特性。

1 MUSIC 谱估计方法

MUSIC 谱估计方法是对所要分析的信号的相关函数进行特征分解, 利用信号子空间和噪声子空间的正交性, 构造空间谱函数, 从而搜索谱函数的峰值来估计信号频率。

假设信号 $x(n)$ 是复正弦信号加白噪声, 表达式为

$$x(n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{i\omega_k n} + v(n) \quad (1)$$

收稿日期: 2016-05-04; 修回日期: 2016-07-18

作者简介: 李玲(1977—), 女, 辽宁大连人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为噪声信号处理。

通讯作者: 李玲, E-mail: lindali2008@163.com

式中: $\alpha_k = |\alpha_k|e^{i\varphi_k}$ 和 ω_k 分别表示接收信号的复幅度和角频率。初始相位 φ_k 是在 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的随机变量。并且当 $i \neq k$ 时, φ_k 和 φ_i 是相互独立的。 $v(n)$ 是白噪声, 其均值为 0, 方差为 σ_v^2 , $v(n)$ 与信号相互独立。信号向量定义为

$$\mathbf{X}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \cdots \ x(n-M+1)]^T = \mathbf{A}\mathbf{S}(n) + \mathbf{V}(n) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} = [a(\omega_1), a(\omega_2), \cdots, a(\omega_k)] =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{-i\omega_1} & e^{-i\omega_2} & \cdots & e^{-i\omega_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-i(M-1)\omega_1} & e^{-i(M-1)\omega_2} & \cdots & e^{-i(M-1)\omega_k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

向量 $\mathbf{a}(\omega)$, 信号 $\mathbf{S}(n)$, 噪声 $\mathbf{V}(n)$ 分别定义为

$$\mathbf{a}(\omega) = [1 \ e^{-i\omega} \ \cdots \ e^{-i(M-1)\omega}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{S}(n) = [\alpha_1 e^{i\omega_1 n} \ \alpha_2 e^{i\omega_2 n} \ \cdots \ \alpha_k e^{i\omega_k n}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{V}(n) = [v(n) \ v(n-1) \ \cdots \ v(n-M+1)]^T \quad (6)$$

向量 $\mathbf{X}(n)$ 的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{XX} = E\{\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n)\} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H + \sigma_v^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

式(7)中: \mathbf{I} 是一个 $M \times M$ 维的单位矩阵, \mathbf{P} 是信号 $\mathbf{S}(n)$ 的自相关矩阵。

对 \mathbf{R}_{XX} 进行特征值分解, 有

$$\mathbf{R}_{XX} = \mathbf{U}_S \mathbf{\Sigma}_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \mathbf{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H \quad (8)$$

式(8)中: \mathbf{U}_S 是由较大特征值对应的特征向量构成的子空间, 为信号子空间, \mathbf{U}_N 是由较小特征值对应的特征向量构成的子空间, 称为噪声子空间。在理想条件下, 信号频率向量 $\mathbf{a}(\omega)$ 与噪声子空间的特征向量正交, 即

$$\sum_{i=k+1}^M |\mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{u}_i|^2 = 0, \quad k=1, 2, \cdots, K \quad (9)$$

由噪声子空间的向量构成的矩阵为

$$\mathbf{G} = [\mathbf{u}_{k+1} \ \mathbf{u}_{k+2} \ \cdots \ \mathbf{u}_M] \quad (10)$$

另一种表达形式为

$$\mathbf{a}^H(\omega_k) \left(\sum_{i=k+1}^M \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \right) \mathbf{a}(\omega_k) = \mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{G}(\omega_k) \mathbf{G}(\omega_k) \mathbf{a}(\omega_k) = 0 \quad k=1, 2, \cdots, K \quad (11)$$

在实际应用中, 由于用协方差矩阵的估计 $\hat{\mathbf{R}}_{XX}$ 来替代 \mathbf{R}_{XX} 进行特征值分解, 所以在给定某一频率 ω_k , 信号频率向量 $\mathbf{a}(\omega_k)$ 和噪声子空间向量 \mathbf{u}_i 并不能完全正交, 而是一个很小的值, 于是, 可以利用如下函数来实现信号频率的估计。

$$\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega) = \frac{1}{\mathbf{a}(\omega_k) \mathbf{G}(\omega_k) \mathbf{G}(\omega_k) \mathbf{a}^H(\omega_k)} \quad (12)$$

信号角频率的估计可以由函数 $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 的 k 个峰值位置确定。

谱函数 $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 的峰值的位置反映了信号的频率值, 但是它并非信号的功率谱, 不能反映出目标的量级特征。一般将 $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 称为 MUSIC 谱。

MUSIC 算法实现步骤:

步骤 1: 计算样本自相关矩阵 \mathbf{R}_{XX} 的特征值分解, 得到其主特征 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_k$ 和次特征值 σ_v^2 , 并储存主特征值为 s_1, s_2, \cdots, s_k 。

步骤 2: 利用式(12)计算 MUSIC 谱 $P_{\text{MUSIC}}(\omega_i)$, 其中 $\omega_i = (i-1)\Delta\omega$, 网格 $\Delta\omega$ 可取作 $2\pi \times 0.001$ 等。

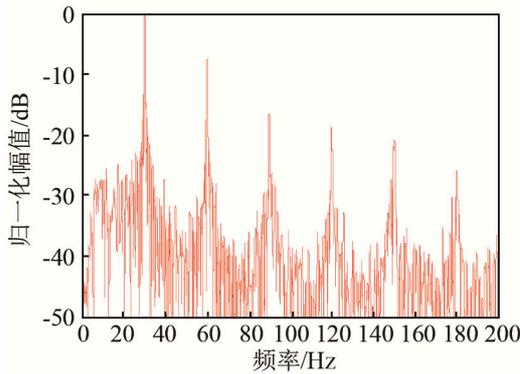
步骤 3: 找出 $P_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 的 k 个峰值, 它们就是待求的 MUSIC 估计值 $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_k$ 。

2 实测数据分析

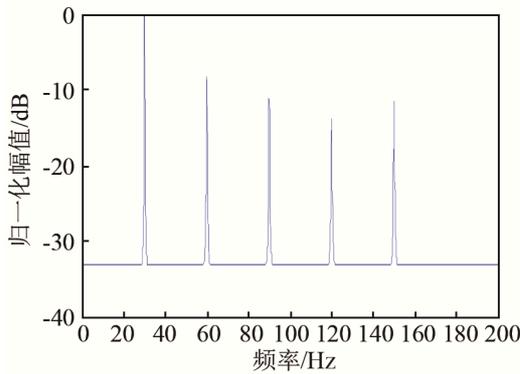
直升机飞行辐射噪声可以分为两大类: 一类为气动噪声, 另一类为机械噪声。气动噪声包括涡流与物体相互作用产生的直升机旋翼、尾桨的旋转噪声及发动机进气排气噪声。机械噪声是由机械部件之间的撞击摩擦以及周期性相互作用而产生。直升机噪声由宽带连续谱和线谱组成, 线谱主要由主旋翼和尾桨产生, 以基频的倍数成谐波关系。一般情况下, 主旋翼旋转噪声的基频在 10~30 Hz 之间, 而尾桨旋转噪声的基频在 50~100 Hz 之间。但在一些实际测试中, 某些类型的直升机只能测出旋翼噪声, 某些类型的直升机可以同时测出旋翼和尾桨噪声。

下面的数据来自于 3 组实测的直升机空中辐射噪声数据, 这些直升机声信号由微音器 B&K4190 布放在距离地面 2 m 处的架子上, 以 44.1 kHz 的采样频率进行采集获取的。在本文中, 针对 2 s 的数据分析, 由于直升机声信号的特征主要集中在 400 Hz 以下, 对原数据进行 50 倍的降采样, 使得采样率变为 882 Hz。计算时从每组数据中抽取 4 096 个样本点。对每组数据分别采用 FFT 以及 MUSIC 处理算法, 并对分析处理的结果进行比对。具体分析结果如下。

图 1 是在 I 型直升机飞行高度 200 m 和匀速飞行水平距离大约 1 km 的条件下获取到的辐射噪声数据, 对其进行简单的 FFT 处理及 MUSIC 算法处理得到的结果。从 MUSIC 算法得到的频谱图中能够清晰地看到主旋翼的谐波线谱分别为 29.9、59.89、89.79、119.9、149.9 Hz, 均近似为 29.9 Hz 的整数倍。



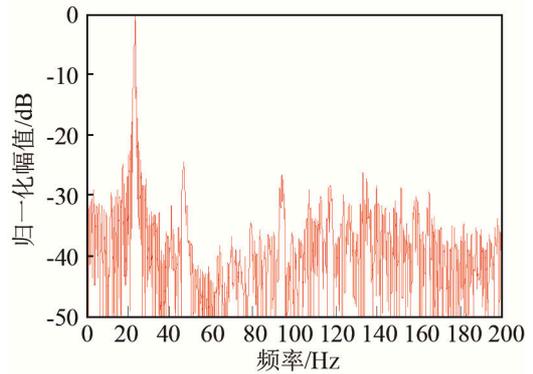
(a) 传统频谱分析



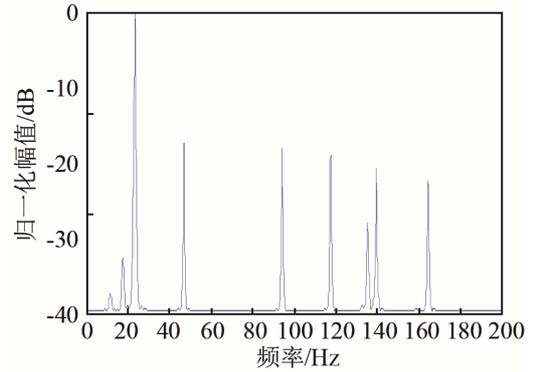
(b) MUSIC 频谱分析

图 1 I 型直升机的 FFT 与 MUSIC 谱图

Fig.1 FFT and MUSIC spectrums of helicopter I



(a) 传统频谱分析



(b) MUSIC 频谱分析

图 3 II 型直升机的传统谱与 MUSIC 谱图

Fig.3 FFT and MUSIC spectrums of helicopter II

图 2 是在 II 型直升机距离地面 200 m 匀速飞行，水平距离 500 m 条件下利用微音器获取到的辐射噪声时域波形。采样频率为 44.1 kHz，采集时间为 1.2 s。由于直升机的噪声主要来源于主旋翼的旋转噪声，从图 2 中能够看到一组正弦信号的叠加。图 3 是对其进行 FFT 处理和 MUSIC 算法处理得到的结果。从图 3 中可以看出，通过 MUSIC 算法能够提取淹没在背景噪声中的特征谱线。主旋翼的线谱分别为 23.46、47.01、94.29、117.6、139.5、164.5 Hz，均近似为 23.46 Hz 的整数倍。

从图 1 和图 3 中清晰地看到，利用基于 MUSIC 功率谱估计算法能够提高信号的信噪比，并能够去除较强的背景噪声。这是由于基于 MUSIC 功率谱

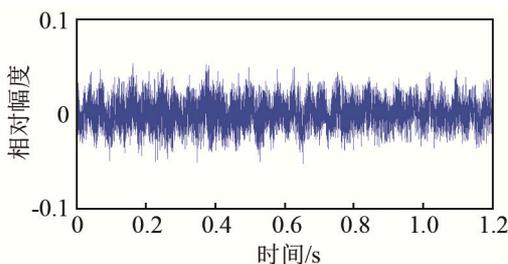
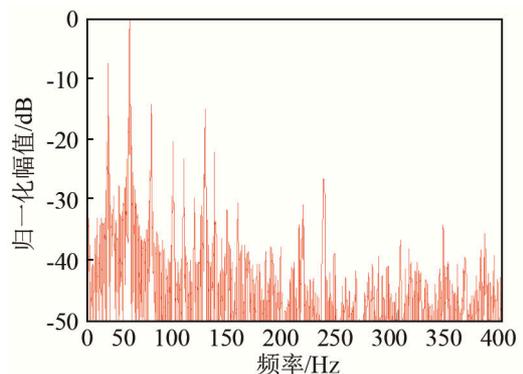


图 2 II 型直升机的辐射噪声时域波形

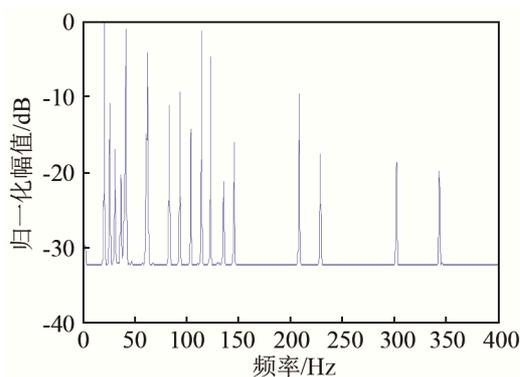
Fig.2 Radiation noise of helicopter II

估计算法是将实测信号进行自相关处理，对自相关函数进行特征值分解，将大特征值的特征向量提取出来进行分析，将小特征值对应的特征向量剔除掉，从而构造出 MUSIC 谱，最终得到了较为理想的结果。

图 4 是对用于救助的直升机在飞行高度为 300 m 的条件下，匀速飞行过顶时刻获取的辐射噪声数据，对其进行 FFT 处理和 MUSIC 算法处理得到的结果。从 MUSIC 算法得到的频谱图中能够清晰地看到主旋翼的谐波线谱特征，发现在 0~50 Hz 之间出现有规律的特征线谱，如图 5 所示。



(a) 传统频谱分析



(b) MUSIC 频谱分析

图 4 用于救助的直升机FFT与MUSIC谱图

Fig.4 FFT and MUSIC spectrums of the helicopter for salvation

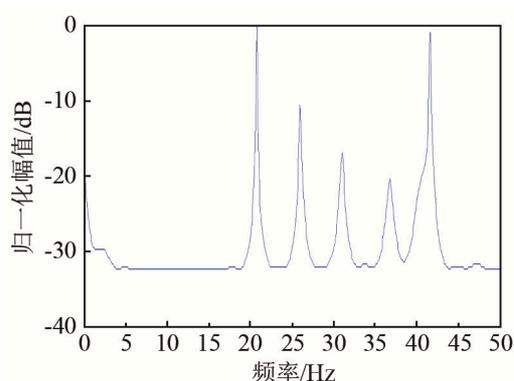


图 5 用于救助的直升机 MUSIC 谱图(0~50 Hz)

Fig.5 MUSIC spectrum of the helicopter for salvation(0~50 Hz)

从图 5 中能够观察到在两个主峰之间出现 3 个等间隔频率的子谐波,这是由于在时间序列上 4 个气缸燃烧速率峰值的高度不一致所导致的。在幅度上峰值不相等是由于 4 个气缸之间有轻微的差异,从而在两个主谐波之间出现 3 个等间距分谐波。并且从这个结果中能够判断出该机型有 4 个气缸。由此可见, MUSIC 算法能够使得线谱特征更加突出。

3 结 论

本文对基于 MUSIC 功率谱估计算法进行详细阐述,进而利用该方法对实测直升机空中辐射噪声数据进行分析与处理,得到其频谱特征。从结果中清晰地看到,采用 MUSIC 算法提高了特征线谱的信噪比,使得特征线谱更明晰。但是基于 MUSIC 功率谱估计算法对高信噪比的信号具有较佳的处理效果,对于信噪比不高的情况,还需要进一步探索更为完善的处理方法来得到明晰的线谱特征,为下一步的分类识别提供更强有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Michael J. Buckingham, Eric M. Giddens Propeller noise from a light aircraft for low-frequency measurements of the speed of sound in a marine sediment[J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2002, **10**(4): 445-464.
- [2] 徐桂芳,高勇. 对称相关用于直升机声信号特征提取[J]. *探测与控制学报*, 2010, **32**(3): 22-26.
XU Guifang, GAO Yong. The application of symmetric correlation function in feature extraction of helicopter acoustic signal[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, **32**(3): 22-26.
- [3] Yoon Sang Ho, Kim Byungwook, Kim Young Soo. Helicopter classification using time-frequency analysis[J]. *Electronics Letters*, 2003, **36**(10): 1871-1872.
- [4] 张浩,高勇. $1\frac{1}{2}$ 维谱估计在直升机声信号特征提中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2008, **23**(4): 476-480.
ZHANG Hao, GAO Yong. Application of one and half spectrum estimation in feature extraction of helicopter acoustic signals[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2008, **23**(4): 476-480.
- [5] 祝龙石,张清泰,刘紫英. 直升机噪声理论分析[J]. *制导与引信*, 1994(4): 10-15.
ZHU Longshi, ZHANG Qingtai, LIU Ziying. Theoretical analysis on helicopter noise[J]. *Guidance & Fuze*, 1994(4) :10-15.