

# 无人直升机轴频磁场信号检测方法研究

范尧<sup>1,2</sup> 王志宇<sup>4</sup> 方广有<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;

4. 中国电子科技集团公司第三研究所 北京 100016)

**摘要:** 轴频磁场信号是无人直升机在机动飞行时产生的一种重要物理场,是一种难以被隐藏的目标特征信号。通过分析轴频磁场信号能实现对无人直升机的检测和识别,并能监测其运动状态。利用磁场传感器采集无人直升机的轴频磁场信号,并利用短时傅里叶变换算法对实测数据进行时频分析。实测结果表明,无人直升机在机动飞行中能产生特定随运动状态变化的5~40 Hz的轴频磁场信号。通过对该特征信号的提取,实现了对无人直升机的准确检测和识别,该探测方法在实测数据的应用中取得了良好的效果。

**关键词:** 无人直升机;轴频信号;磁场传感器;短时傅里叶变换

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Research on shaft rate magnetic field signal detection method of the unmanned helicopter

Fan Yao<sup>1,2</sup> Wang Zhiyu<sup>4</sup> Fang Guangyou<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China ;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China ;

3. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. The 3rd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100016, China)

**Abstract:** Shaft rate magnetic field signals produced by the unmanned helicopters in maneuver flight is an important physical fields, which is difficult to be stealth. Unmanned helicopters can be detected and identified by analyzing the shaft rate magnetic signal, and the status of the unmanned helicopters can be monitored. In this paper, the magnetic field sensors are used to detect the shaft rate magnetic field signals of the unmanned helicopters. Short time Fourier transform for time-frequency analysis is applied to deal with the measured data. The testing results show that the specific shaft rate magnetic field signals of 5~40 Hz which are related to unmanned helicopter's status are generated in unmanned helicopters maneuver flight. According to the characteristics of the signal, detection and identification of unmanned helicopters are realized. The detection method has a good effect in the real data application.

**Keywords:** unmanned helicopter; shaft rate magnetic field signal; magnetic field sensor; short time Fourier transform

## 1 引言

在现代战争中,无人直升机因其体积小、重量轻、行动适应性强等特点而在战场侦查、监视、探测等方面发挥着重要作用,在多个国家得到装备,如新西兰“蛇鲨”无人直升机、加拿大“哨兵”无人直升机、英国“斯普莱特”无人侦查直升机和美国“火力侦察兵”无人直升机等<sup>[1]</sup>。无人直升机具有良好的超低空和贴地飞行能力,具有良好的雷达、红外和声隐身性能,对其探测和跟踪十分困难,这使安全防御系统存在一定的隐患。

旋翼直升机飞行时产生的噪声包括发动机排气噪声和螺旋桨噪声,而螺旋桨噪声占据主要部分<sup>[2]</sup>。螺旋桨噪声受螺旋桨桨叶转速和螺旋桨叶片数量影响,而旋翼直升机在飞行中螺旋桨桨叶转速一定,因而螺旋桨噪声中将包含某一固定频率及其高次谐波信号。该固定频率一般为数Hz至几十Hz<sup>[3]</sup>,是较难被隐藏的特征信号。

根据螺旋桨噪声包含该固定频率信号这一特征,本文提出使用短时傅里叶变换分析由磁场传感器采集到的无人直升机轴频磁场信号,得到轴频信号的时频分析图,通过在时域分析图上对特征频率信号的查找,进而将目标准确地

检测出来。该检测方法可以作为边境安全防御网络的补充,对于国防安全建设有着积极意义。

## 2 短时傅里叶变换

无人直升机飞行时螺旋桨转动引起的磁场轴频信号较为微弱,往往淹没在杂波之中,且无人机飞行速度较快,时域信号持续时间较短,在时域上难以对其进行检测。同时由于杂波的频段与目标信号相重叠的,仅仅对信号做傅里叶变换得到其频域的信息仍然不能有效检测到目标信号。传统傅里叶变换只能得到信号的整体频率成分信息,无法对局部信号的频率成分进行分析。作为非平稳信号的一种分析工具,短时傅里叶变换选择适当宽度的窗函数,将信号局部截断,将窗内截断信号近似视为平稳信号,将该截断信号进行傅里叶变换,得到其短时频谱特性,将所得短时频谱综合得到短时傅里叶变换谱[4,5,6,7,8,9,10,11]。短时傅里叶变换能反映信号频率成分随时间变化的规律,可用于检测无人直升机飞行时磁场传感器所观测的非平稳信号。

对于连续时间信号  $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ,其数学表达式为:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: $A$ 表示幅度, $\omega$ 表示瞬时角频率, $\varphi$ 表示信号初始相位。由于所采集的信号是随机信号,因此, $A, \omega, \varphi$ 都是随机变量。

对于连续时间信号  $z(t)$ ,其短时傅里叶变换(STFT)定义为:

$$\text{STFT}_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(\tau)w^*(\tau - t)]e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

其中, $w(u)$ 为时间宽度很短的窗函数,\*代表负共轭,常用的窗函数有矩形窗、海宁窗、汉明窗、高斯窗等,如图1所示,随着窗函数在时间轴上滑动,对截取的每一段局部信号做频谱分析。

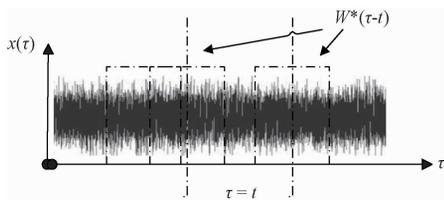


图1 连续短时傅里叶变换时域图

对于离散信号  $x(k)$ ,其短时傅里叶变换的离散化形式为

$$\text{STFT}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)w^*(kT - mT)e^{-j2\pi nFk} \quad (3)$$

式中: $T, F(T > 0, F > 0)$ 分别为时间变量和频率变量的采样周期, $m, n$ 为整数,分别对应时频图的横坐标和纵坐标,如图2所示,为方便表示起见,仍把他们化成连续形式。

短时傅里叶变换在通过加窗函数对信号进行分析时,若时间分辨率  $\Delta t$  和频率分辨率  $\Delta \omega$  越小,则信号分析的局

部化程度越高,聚焦性越好,但由测不准原理  $\Delta t \cdot \Delta \omega > 1/2$  可知,时间分辨率  $\Delta t$  和频率分辨率  $\Delta \omega$  不可能同时减小,窗函数长度越大,时间分辨率越差,频率分辨率越好,相反,窗函数长度越小,时间分辨率越好,频率分辨率越差。若窗函数选择不当,当窗宽超过非平稳信号的局部平稳长度时,窗函数内的信号将又因非平稳而使相邻的频谱混叠,不能正确表现局部频谱。因此,在利用短时傅里叶变换进行分析时,应根据时间分辨率和频率分辨率的双重要求而选取合适的窗宽。

## 3 测试与结果分析

测试实验于2016年5月13日在山东潍坊进行,测试对象为中国企业研制的V750型号无人直升机。V750无人直升机长8.53 m、宽2.08 m、高2.11 m,是国内最大无人直升机,具有145 km/h的巡航速度。测试所用磁场传感器为中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室自主研制的CAS30磁棒,噪声水平低至1 pt/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz,是进行低频磁场信号测量的理想设备。测试分悬停实验和飞行实验两部分进行。

### 3.1 悬停实验

悬停实验目的在于准确地测量无人直升机从停机状态下到起飞、悬停、降落、停车等一系列状态下轴频信号的频率特性,实验布置如图3所示,两支磁场传感器分别测量X、Y两个磁场分量,磁场传感器距离无人直升机停机坪(起飞点和降落点)约15 m。磁场传感器数据由便携式接收机采集并存储,采样率为16 kHz,信号检测时降采样至160 Hz。飞机起飞后,高度逐渐上升并小范围偏移,在空中短暂悬停后高度逐渐降低,并停在停机坪处。

使用短时傅里叶变换对测量数据进行时频分析,取窗宽为1.6 s,得到结果如图4所示。在起飞阶段,首先对发动机预热,预热开始时轴频磁场信号频率在5.5~5.9 Hz范围波动,随后稳定在5.76 Hz。预热结束后,发动机带动螺旋桨加速,信号频率随之逐渐增加,约16 s后轴频信号频率增加至7.72 Hz,也即无人直升机从地面上飞起。在降落阶段,轴频信号频率变化过程与起飞阶段相反,无人直升机降落至地面后,发动机开始降速,轴频信号频率也下降至5.76 Hz。在发动机完成散热后,发动机停车,轴频信号频率从5.76 Hz逐渐降低至零。在螺旋桨完全停止之后,测量数据中不再有特定频率信号。(处理  $H_y$  分量1 050~

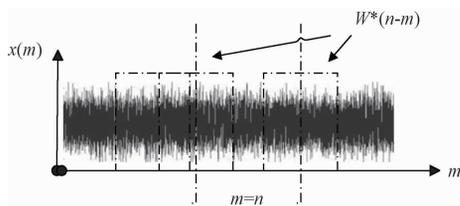


图2 离散短时傅里叶变换时域图

1 400 s 数据段, 时间窗为 1.6 s, 现有的窗太长。)

在图 4 中除主螺旋桨转动所带来的轴频信号基频及其高次谐波(11.52 Hz、17.28 Hz 等)外, 还可以观测到尾桨转动所带来的轴频信号, 在发动机预热和散热阶段, 尾桨轴频信号频率均在 35.48 Hz 附近波动。

当无人直升机悬停高度在 30 米时, 所得到的时频图如图 5 所示。(需要额外处理的图,  $H_x$  分量 950~1 000 s 段, 时间分辨率 1.6 s)。由于飞行高度的增加, 轴频信号减弱, 但依然可以清晰地看到主螺旋桨转动所带来的 7.72 Hz 轴频信号, 而高次谐波则相对较弱。

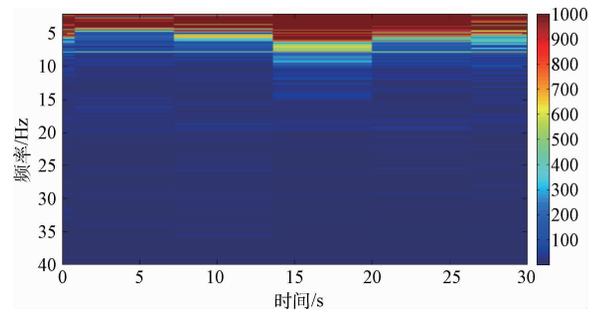


图 5 30 m 高度悬停时测量数据时频

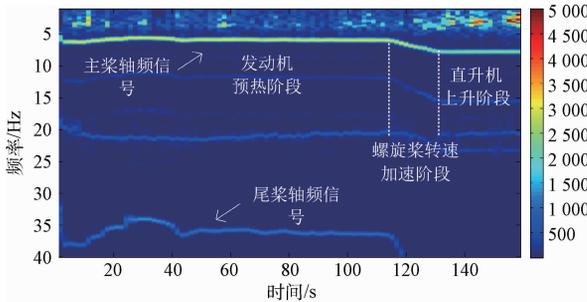


图 3 悬停实验布置

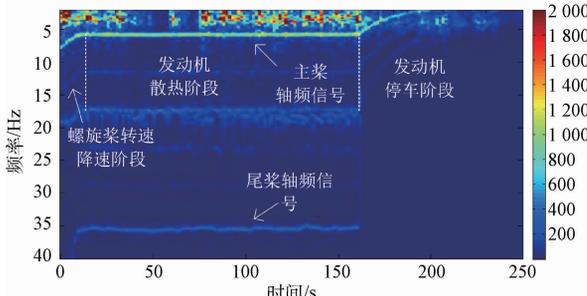
### 3.2 飞行实验

为检测磁场传感器对飞机超低空飞行时的检测效果, 无人直升机在飞行高度为 90 m 时分别以 15 m/s 和 25 m/s 的速度飞过磁场传感器上方, 磁场传感器则布置在相对较为空旷的农田间小路附近。利用短时傅里叶变换对测量数据进行时频分析, 取窗宽为 3.6 s, 所得结果如图 6 所示。在飞行速度为 15 m/s 时, 可以在图中较为明显地看到 7.72 Hz 的轴频信号及其二次谐波。当飞行速度为 25 m/s 时, 7.72 Hz 的轴频信号较 15 m/s 分行时略微显著。

实验结果表明, 在不同飞行速度下, 无人直升机螺旋桨转动所产生的轴频信号为确定的固定频率, 根据这一特征信号即可实现对直升机的检测与识别。

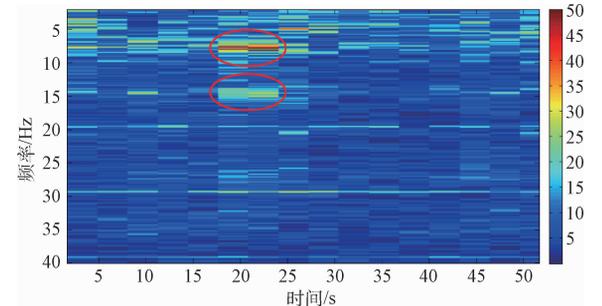


(a) 起飞阶段

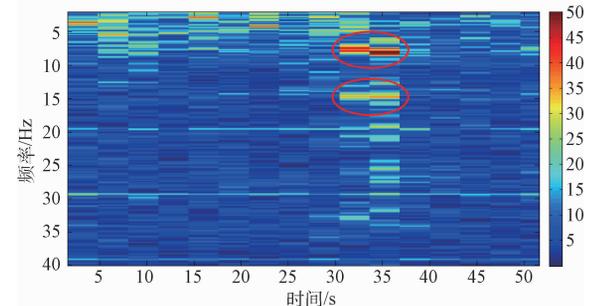


(b) 降落阶段

图 4 测量数据时频



(a) 飞行速度为 15 m/s 时



(b) 飞行速度为 25 m/s 时

图 6 测量数据时频

## 4 结 论

本文研究了磁场传感器在无人直升机检测与识别中的

应用问题。根据无人直升机在飞行过程中产生特定频率的轴频信号这一特征,本文使用磁场传感器对无人直升机进行检测与识别。由于无人直升机飞行速度较快,其轴频信号仅在极短时间内被磁场传感器所测量到,因而利用短时傅里叶变换对数据进行时频分析,以反映频率成分随时间变化的规律。在无人直升机悬停和机动飞行过程中,该方法均能有效检测到无人直升机的轴频磁场信号。

## 致 谢

感谢潍坊天翔航空工业公司相关工作人员在实验过程中所给予的帮助。

## 参考文献

- [1] 陶于金,李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014, 464(20): 34-39.
- [2] HSU J S, STEIN J. Shaft signals of salient-pole synchronous machines for eccentricity and shorted field coil detections[J]. CEM Publications, 2015.
- [3] UNAL M, ONAT M, DEMETGUL M, et al. Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm optimized neural network[J]. Measurement, 2014(58): 187-196.
- [4] 李宏斌,徐楚林,温周斌. 基于短时傅里叶变换的异常音检测方法[J]. 声学技术, 2014, 33(2): 145-149.
- [5] 徐永海,赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011(8): 174-180.
- [6] 徐健,张语劼,李彦斌,等. 短时傅里叶变换和S变换用于检测电压暂降的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014(24): 44-48.
- [7] 苗晟,王威廉,姚绍文. 一种基于模板匹配的复杂心音定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 119-123.
- [8] 周丹. 短时傅里叶变换和提升小波变换在脉象信号分析中的应用[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [9] 廖传军,李学军,刘德顺. STFT在AE信号特征提取中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1862-1867.
- [10] 向强,秦开宇. 基于线性正则变换与短时傅里叶变换联合的时频分析方法[J]. 电子学报, 2011(7): 1508-1513.
- [11] 牛犇,任文娟,胡东辉,等. 基于STFT的宽带信号时差测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(10): 17-21.

## 作者简介

**范尧**, 1992年出生,硕士研究生,研究方向为低频信号处理算法等。

E-mail: 252705989@qq.com

**王志宇**, 1987年出生,博士研究生,研究方向为低频电场传感器、低噪声放大技术等。

**方广有**, 1963年出生,研究员,研究方向为超宽带雷达成像理论与方法、地下资源电磁勘探技术、超宽带天线理论与技术和太赫兹成像技术等。