|  |
| --- |
| 1．选题的目的和意义 |
| **选题目的**：  本选题着眼于非平稳信号处理领域的实际问题，以瞬时互相关函数型Wigner分布（ICFWD）为主要研究对象，对线性正则域Wigner分布理论及应用进行了系统深入的研究。非平稳信号检测作为估计与跟踪的必要前提，是通信、雷达、卫星等现代信号处理系统分析面临的基础性问题，是探索和发现新的自然规律、研究和发展高新技术的重要技术手段，属于非平稳信号处理领域的热点研究内容。传统Fourier分析框架下的时频分析工具已不能满足检测线性调频信号时对信号表示高灵活性的需求，亟待从根本原理出发提出创新性研究思路、开辟创新性技术途径，这与当前信息学科的研究重点和热点相契合，具有重要的理论意义和工程应用价值。由于线性正则域Wigner分布的非平稳信号检测方法仍需优化，本选题从非平稳信号表示灵活性增强的需求出发，考虑将线性正则变换自由参数引入传统Wigner分布，由广泛而重要的实际需求驱动，旨在高效检测线性调频信号。本选题的目的主要如下：   1. 通过对线性正则变换与Cohen类时频分布的有机结合进行系统深入的研究，明确线性正则域Wigner分布理论的主要研究对象，在非平稳信号时频分析和非平稳信号检测的基础上，运用并发展线性正则变换、Wigner分布、非平稳信号分离等现代数学方法，揭示ICFWD技术的工作原理构建相关理论。 2. 在明晰线性正则变换与Cohen类时频分布两者关系的基础上，针对含噪非平稳信号构建输出方差信噪比改善的数学理论基础，揭示非平稳信号检测性能提升的内在机制。 3. 从检测单分量线性调频信号出发，通过判断输出信噪比不等式关系是否成立来进行线性正则变换自由参数的取舍，结合期望不等式模型和方差不等式模型构建基于输出信噪比的ICFWD与WD不等式组模型，实现非平稳信号表示灵活性增强的最终目标。   **选题意义**：  线性正则变换是一种具有三个自由度的广义Fourier变换，突破了传统Fourier变换只能在时域或频域进行信号分析的局限，能够在介于时域和频域之间的线性正则域表示信号，在非平稳信号处理中具有足够的灵活性。考虑非平稳信号处理对多分量或强噪声干扰下信号表示灵活性的要求，本选题拟采用在传统Wigner分布中引入线性正则变换自由参数的方法，构建线性正则域Wigner分布理论，并提出通过方差输出信噪比改善数学理论基础的研究确立非平稳信号检测的方法。本选题通过线性正则域Wigner分布理论及其在信号检测中的应用研究，为非平稳信号检测提供一种兼具自由度并保证计算速度的信号表示工具，对非平稳信号处理领域的应用具有重要的理论指导意义。  闭形式瞬时互相关函数型Wigner 分布是线性正则域Wigner分布理论的主要研究对象，且基于闭形式线性正则域瞬时互相关函数特性而引入线性正则变换自由参数的方法已证明其在非平稳信号分离和检测中符合信号表示灵活性增强的内在要求。然而，该部分研究仅通过针对含噪线性调频信号的数值仿真分析表明了线性正则变换自由参数与检测性能之间的因果关系，尚未考虑这一因果关系的数学表述问题。因此，线性正则变换自由参数引发非平稳信号检测性能提升的内在机制揭示，是一个值得深入研究的关键科学问题。本选题拟开展线性正则域Wigner分布研究，提出一种基于ICFWD的雷达线性调频信号高效检测方法，针对含噪信号构建方差输出信噪比改善的数学理论基础，并结合之前的期望不等式模型，构建基于输出信噪比的ICFWD与WD不等式组模型，揭示非平稳信号检测性能提升的内在机制。  综上所述，该选题对非平稳信号处理领域的应用具有重要的理论指导意义，是一个值得深入研究的关键科学问题。 |
| 2．国内外研究现状 |
| 近年来，线性正则变换的离散算法理论研究取得了丰硕成果，极大地促进了线性正则域信号表示、采样、重构等理论研究，以及线性正则域信号滤波、分离、检测、估计等应用研究的快速、蓬勃发展。当前，ICFWD技术主要围绕线性正则变换和Wigner分布展开。  线性正则变换与其他线性时频变换的有机结合取得了丰硕成果。Fourier变换是应用非常广泛的一种信号处理工具[1]，对一个信号连续做Fourier变换两次即可得该信号关于时域的反转，连续做四次可得原信号。FRFT在刚出现的时候被应用于解方程，后来被广泛应用于光学领域，又在Almeida等人的努力下[2,3]，越来越多人开始重视起其在信号处理领域的潜力[4]。由于FRFT变换是Fourier变换的分数阶形式，故它还是只具有一个参变量，处理更加普遍和一般的问题不够灵活[5]。于是，为了满足对解答问题一般性的条件，更多参变量的引入使FRFT变换进一步被推广成线性正则变换（Linear Canonical Transform，LCT）[6]。线性正则变换将旋转扩展为仿射，可视为一种广义的分数阶Fourier 变换。该变换具有三个自由参数，能够在比分数域更大的线性正则域实现更优的信号表示。  与此同时，Wigner分布也取得了较大进展。Wigner分布（简称WD）是典型的二次型变换[7]，它定义为信号瞬时相关函数的Fourier变换，反映了信号瞬时时频关系。1932年，Wigner在研究量子统计力学时定义了Wigner分布，但并未将其用于非平稳信号处理[8]。1948年，Ville从信号分析的角度重新推导了Wigner分布的数学表达式，因此Wigner分布也被称为Wigner-Ville分布。1980年，Claasen和 Mecklenbrauker 系统地研究了基于Wigner分布的信号表示理论。近30年来，时频分析领域涌现出一系列具有交叉项抑制作用的广义Wigner分布[9]。2001年，Pei 和他的博士生Ding基于LCT与WD和AF之间的时频面仿射变换关系，提出了线性正则域Wigner分布和线性正则模糊函数的概念。2002年和2004年，Milne和Nie分别研究了Wigner分布在低截获概率雷达系统和低信噪比混沌系统分析中的应用[10,11]。2011 年，Zhao等人对线性正则模糊函数的基础理论做了一定补充。2012年，Li等人研究了基于LCT核函数的 Wigner分布和模糊函数理论及应用[12]。同年，Tao等人独立给出了基于LCT核函数的模糊函数理论及应用。2015，Zhang提出ICFWD的概念，即将LCT和传统Wigner分布相结合，引入多个线性正则变换自由参数，改善了检测效果。  综上，Almeida等、Ville等、Pei 等、Zhao等、Li等专家学者以及指导老师张志超博士对基于线性正则变换的Wigner 分布的含噪线性调频信号检测做出了重大贡献，初步确立的线性正则域Wigner 分布模型为本选题基于输出信噪比的ICFWD与WD不等式组模型的构建提供了数学理论支撑。 |

|  |
| --- |
| 3．研究内容 |
| 1. 根据ICFWD方差信噪比的定义，精确建立ICFWD与传统Wigner分布的方差不等式关系； 2. 针对含噪线性调频信号构建基于输出信噪比的ICFWD与WD不等式组模型； 3. 通过对比ICFWD在不同模型下处理含噪线性调频信号的能力，揭示非平稳信号检测性能提升的内在机制； 4. 针对不同条件下LCT自由参数的选取，分析ICFWD处理含噪线性调频信号的效果，揭示线性正则变换自由参数引发非平稳信号解耦合的原理； |
| 4．实施方案、进度安排及预期效果 |
| 2021.11~2022.01：大量查阅文献，熟练掌握线性正则变换与其他线性时频变换的区别，建立如何构建ICFWD与Wigner分布的方差不等式关系，做好论文准备阶段的规划为下一阶段的研究做准备;  2021.02：大量阅读与非平稳信号分离和检测方法相关的文献，熟悉基于输出信噪比的ICFWD与WD不等式组模型的构建方式。确定论文标题，在导师的指导下完成论文标题、任务书和开题报告。  2021.03：确定论文写作模块，并逐步开始论文写作；推导xxx。力求在三月底基本完成初稿内容，向老师提交初稿并根据意见修改论文写作。  2021.04：在导师的指导下，检查论文结果是否严谨，数据是否有误，并多次对初稿做进一步的检查、修改，并最终完善定稿。  2022.05：在确定无误后准备 PPT 进行答辩。 |
| 5、已查阅参考文献**：** |
| [1] 齐林, 陶然, 周思永, 王越. 基于分数阶Fourier变换的多分量LFM信号的检测和参数估计[J]. 中国科学: E辑, 2003, 33(8): 749-759.  [2] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3084-3091.  [3] Mendlovic D, Ozaktas H M. Fractional Fourier transforms and their optical implementation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(9): 1875-1881.  [4] Shi J, Liu X, Zhang N. Generalized convolution and product theorems associated with linear canonical transform[J]. Signal, Image and Video Processing, 2014, 8(5): 967-974.  [5] Zhang Z, Unified Wigner-Ville distribution and ambiguity function in the linear canonical transform domain[J]. Signal Processing, 2015, 114(9): 45-60.  [6] 李炳照, 陶然, 王越. 线性正则变换域的框架理论研究[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1387-1390.  [7] 向强. 线性正则变换与模糊函数的关系研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 549-553.  [8] 王月玥. 分数阶傅立叶变换在非平稳信号时频分析中的应用[D]. 中国海洋大学, 2009.  [9] 张海勇, 马孝江, 盖强. 抑制时频分布交叉项的一种新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 28-30.  [10] Milne P R, Pace P E. Wigner distribution detection and analysis of FMCW and P-4 polyphase LPI waveforms[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 13-17 May 2002, Orlando, FL, USA.  [11] Nie C, Shi Y, Yi Wen, Cheng F. Time-frequency analysis of chaos system based on Wigner distribution[C]. Proceedings 7th International Conference on Signal Processing, 31 August-4 September 2004, Beijing, China.  [12] Li B, Xu T. Spectral analysis of sampled signals in the linear canonical transform domain[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012, Article ID 536464. |