

项目名称：自适应 Fourier 变换：新的时频分析理论与方法

主要完成人：钱涛 (澳门大学)

推荐单位意见：

该项目提出了一个主要包括单分量 (mono-component) 函数论、自适应 Fourier 分解 (Adaptive Fourier Decomposition, AFD) 以及高维推广的新的理论体系。单分量函数论是关于具有正解析瞬时频率的信号的理论。该项目证明了单分量函数类包括复几何、解析函数边值以及调和函数中几个经典的函数类。而 AFD 作为 Fourier 变换的推广及个性化，将一般信号表示为其内蕴的单分量信号的和，提供精微的频率分析，因而具有广泛的应用前景。已被用于控制论与系统辨识、超强测不准原理、滚动轴承故障诊断、水质检测、心肺音隔离、心电图、图像去噪、数字水印、语音分析等信号分析与处理实践中。另外，为了从频率域上刻画各种流形上的解析信号，该项目将 Paley-Wiener 对经典 Hardy 空间的 Fourier 谱刻画拓展到单复变、多复变以及 Clifford 代数上各种实与复的经典流形上的一般的 H_p 空间上；在空间域上构建了球面 Lipschitz 扰动上的奇异积分算子代数，后者包括构成球面解析信号的球面 Hilbert 变换为其特例代数元。该算子代数研究促使项目推广了 Fueter 及 Sce 的定理到任意维数的 Euclidean 空间。有关成果被同行专家称为“钱方法”和“钱定理”，不仅具有很高的学术水平，而且也有很广泛的应用价值。

我单位审阅了提名书全文，并对该项目的拟推荐情况进行了公示，目前无异议。

对照国家自然科学奖授奖条件，同意推荐该项目申报 2018 年度国家自然科学奖二等奖。

项目简介：

该跨学科项目创立了单分量函数论及自适应 Fourier 分解之新数学理论。其原创性贡献包括三方面：(i) 解决了信号分析领域内存在 60 年的疑难；(ii) 所建立的数学理论可直接用于信号分析；以及 (iii) 与传统数学有深与广的联系，开创了一个理论与应用研究的新领域。其前期 (2000-2012 年) 工作 (瞬变信号的时频分析与算法实现) 获得澳门自然科学一等奖；后期工作完善及推广了前期工作的理论及算法，开拓了其应用。该项目概括为三个重要科学发现：

第一，创立了单分量 (Mono-component 或 MC) 函数论及自适应 Fourier 分

解 (Adaptive Fourier Decomposition, 简记为 AFD) 的理论及算法。单分量函数论是关于具有非负解析瞬时频率的函数或信号的理论。该项目证明了复几何、解析函数边值以及调和分析中的几个重要的函数类属于单分量函数类。为了将一般信号表示成单分量函数的和, 该项目发明了 AFD 算法。AFD 及其变种快速地将信号表示为其内蕴的具有正瞬时频率的信号的和。项目后期推广其理论到各种实与复流形上具有从标量值到矩阵值的信号类中。基于 AFD 理论该项目将有理逼近推广到多复变量及多实变量的函数空间。

第二, 为深入研究一般的解析信号, 该项目将 Paley-Wiener 对 Hardy 空间的 Fourier 谱刻画结果拓展到单复变、多复变以及 Clifford 代数上各种实与复的经典流形上的空间 ()。谱刻画提供了各种场合中实信号之复 Hardy 空间分解, 从而为各种场合解析信号之频域分析建立了基础。

第三, Hilbert 变换在各种场合构成解析信号的非标量部分。为深入理解作为奇异积分特例的 Hilbert 变换, 该项目构建了球面 Lipschitz 扰动上的奇异积分算子代数理论, 并为攻克其技术难关推广了 Fueter 及 Sce 的定理到任意维数的 Euclidean 空间, 创立了多个实变量的“从单位圆谈起”方法论。

该项目的几个重要结果已被国内外学者誉为钱定理 (T.Qian's Theorem), 其中之一由国际调和与分析领袖 Yale 大学的 R. Coifman 命名; 项目之 AFD 信号重构算法被称为钱方法; 作为纯数学理论的 AFD 已被应用于信号处理、控制论与系统辨识、超强测不准原理、生氧光合作用、心电图、滚动轴承故障诊断、水质检测、e 健康系统、心肺音隔离、图像去噪、数字水印、股票预测、语音分析等信号分析与信号处理实践中。

该项目自 2000 年起发表 SCI 论文及专著共计 102 篇。其中发表在 Trans AMS 1 篇, Proc AMS 1 篇, J.Func.Anal. 3 篇, J. Fourier Anal. Appl. 5 篇, J.Math Anal Appl 5 篇, Automatica 3 篇, IEEE Trans SP 3 篇, Non-linear Anal, Real World Appl.1 篇, Math Methods in Appl Sci 15 篇; 科学出版社专著 2 卷。102 篇论文专著共被引用 1459 次, 其中 8 篇代表性论文共被引用 460 次 (基于 Google Scholar)。

客观评价：

第一部分 钱定理：R.Coifman 等在引文 4 中特别地以项目完成人的姓氏命名了该项目的一个结果为“T.Qian's Theorem” (钱定理, 见其它附件 1 和代表性引文【4】)。该钱定理首次证明了解绕 Blaschke 级数的 ω -收敛性。另外还发现两处由不同的数学家命名的不同的钱定理 (见其它附件 2, 3)。

第二部分 钱方法及其应用：若干信号分析学者将 AFD 方法称为钱方法 (见其它附件 6、7)。列于其它附件 13 中的 [WW] 提到：“钱方法是近几年来由澳门大

学钱涛教授提出来的一种全新的信号分解与重构技术，其蕴含了经典的 Fourier 级数理论。一维钱方法在数字信号的分解重构中取得了非常好的试验结果……”。[W2]提出二维钱方法的快速实现方案以缩减程序运行时间并成功快速地应用于图像去噪。澳门大学的[MZD]、[WWW]和[W]将 AFD 应用于心电图(ECG)研究。[WCW]开发了 AFD 对于心肺音隔离的应用。[Z1]及[Z2]将 AFD 用于股票预测及语音分析。产业化的 AFD 应用包括无锡中科水质环境技术有限公司生产及出售的百万元水质检测仪。其使用 AFD 和 Unwinding 作为信号分析的基本算法，成功开发出“生态毒性生物暴露系统”，较传统 Fourier、小波及 EMD 等方法更有效地分析从高浓度到低浓度不同污染物的生物行为毒理实验数据（其它附件 8）。澳门大学张立明所做的语音分析研究证实基于 AFD 的时频分布优于短时 Fourier 变换[Z2]。控制论方面的文[LF]研究基于 AFD 的迭代学习控制(ILC)。仿真实验证实 AFD 较传统 Fourier 频率域方法能更有效地去除无线传输中的叠合信道噪声，从而输出信号更精确地跟踪目标信号。在系统辨识方面，该项目与南京理工大学蔡晨晓等人“基于自适应傅里叶分解的频域辨识方法”于 2017 年 9 月 1 日提交专利申请（其它附件 9）。北京交通大学梁喻等运用 AFD 方法研究滚动轴承故障诊断[L]。ADF 具有广泛的国际影响力，检索到的其它相关研究还包括：美国 Michigan 大学 F.D.Fulle（用 AFD 研究生氧光合作用，博士论文 [F]）；土耳其（博士论文[AK]研究优化 AFD 算法）；印度学者研发了基于 AFD 的 e-健康人体指针检测仪器[G]；另外发现得克萨斯州 [VV]；加拿大[JM]；德国[RJ, CABM]；比利时[FIF]；葡萄牙[MJH]；意大利[CSS, DVV]；法国[SOM]；日本[SH1-SH4]；西班牙[JBB]；罗马尼亚[MS]；佛得角[NRG]；匈牙利[EP]；瑞士[AP]等有关应用的论文。该项目部分应用情况参见其它附件 16。

第三部分 代表引文评注：引文 1 宣示正是代表性论文【1】的开创性结果激励了他们在 Bedrosian 定理方面的工作。刊登于 Automatica 杂志上之引文 2 基于【2】的思想建立了离散形式的 AFD 并用之于系统辨识。引文 3 证实正是代表性论文【3】以及其他 7 篇该项目发表的论文建立了具有非负解析相位导数之单分量函数概念，并对其进行了系统深入的研究。堪称理论与应用调和分析领袖的 R. Coifman（Yale 大学，美国艺术科学院院士，美国科学院院士，1999 年美国国家科学奖获得者）在与 S. Steinerberger 合作的引文 4 中称【4】是具有特殊重要性的一篇文章，在其中项目完成人证明了 Blaschke 解绕级数对于 Hardy- 空间函数的收敛性。引文 4 也佐证了该项目对 Adaptive Fourier Transform 的首创性，并援引该项目包括【4】在内的 7 篇文章。发表于杂志 ACHA 的引文 5 在给出解析瞬时频率的定义时于众多同类文献中只权威性地引用了代表性论文【5】。引文 6 全面概括了代表性论文【6】的工作为：首先推广 Fueter-Sce 定理到一般场合，然后

用其作为关键性的技术，将高维球面艰深的奇异积分问题简化为单位圆上的问题。发表于 IEEE Biomedical & Health Informatics 的引文 7，作为应用 AFD 【7】于 e-健康的另一篇论文，肯定了 AFD 不像其它传统的变换那样依赖于预处理而是自适应地生成输入信号的表示系统，以实现高效率及保真度。引文 8 在其对 Hilbert 变换的研究中援引了【8】中关于一维复 Hardy- 空间函数边值之谱刻画结果，。此实为该项目所有关于谱刻画结果的第一种情况。

第四部分 AMS 数学评论（节选的 AMS 数学评论）：

AMS 数学评论 1 (MR2457437) Janusz Godula 对代表作【8】评论:…The paper contains several interesting theorems… The author’ s compelling results should inspire further research (见其它附件 5)。

AMS 数学评论 2 (MR2662313) Devendra Kumar 对代表作【4】评论：…The algorithm used in this model are much simpler. This model is less restrictive and has more adaptivity …The results are very interesting (见其它附件 5)。

第五部分 MC-AFD 理论吸引海内外学者共同研究合作：该理论除了被作为两极端的信号处理实践工作者与纯理论数学家所接受及效仿，也吸引了信号分析专家包括 L. Cohen 及 L. Galleani 的交流及合作 (Cohen 与项目完成人互相造访达四次)。D. Alpay（著名分析学家，SCI 杂志 Complex Analysis and Operator Theory 的主编）协同意大利著名分析学者 I. Sabadini，F. Colombo 及该项目完成人，将 AFD 理论推广到多复变量取矩阵值的若干情况，矩阵值 Blaschke 乘积是矩阵值函数分析的尖端课题 [Q23-24]，在矩阵值系统辨识中有决定性的应用。其它与中外数学家的高水平合作包括 [Q13, Q20, Q25-32]。

第六部分 该项目球面 Lipschitz 扰动上奇异积分算子代数的建立及对 Fueter 和 Sce 定理的到任意维数欧式空间推广的相关研究是对多元调和分析及 Clifford 分析学界的突出贡献。该项目完成人被邀请作为国际 ICCA 和 ISAAC 系列会议学术委员以及 2016-2017 届国际 W.K.Clifford 奖的评奖委成员。

第七部分 该项目相关文章的中科院 JCR 分区统计见其它附件 10。

第八部分 该项目完成人获得 2012 年澳门自然科学一等奖（其它附件 11）。

代表性论文专著目录：

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响 因子	年卷页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯 作者 (含 共同)	第一 作者 (含 共同)	国内 作者	SC I 他 引 次 数	他 引 总 次 数	论文 署名 单位 是否 包含 国外 单位
1	Analytic unit quadrature signals with non-linear phase/Physical-Nonlinear Phenomena/ Tao Qian, Qiuhui Chen, Luoqing Li	1.514	2005 年 203 卷 (1-2)	2005 年4月 1 日	Luoqing Li	Tao Qian	钱涛 谌秋辉 李落清	26	33	否
2	Adaptive Fourier series-a variation of greedy algorithm/ Advances in Computational Mathematics /Tao Qian, Yan-Bo Wang	1.316	2011 年 34 卷 (3) 279-293 页	2011 年6月 08 日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛 王彦波	19	23	否
3	Boundary derivatives of the phases of inner and outer functions and applications/ Mathematical Methods in the Applied Sciences/Tao Qian	1.017	2009 年 32 卷 (3) 253 - 263 页	2008 年5月 16 日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛	6	6	否
4	Intrinsic mono-component decomposition of functions: An advance of Fourier theory/ Mathematical Methods in the Applied Sciences/Tao Qian	1.017	2010 年 33 卷 (7) 880-891 页	2010 年5月 15 日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛	8	11	否

5	Analytic signals and harmonic measures /Journal of Mathematical Analysis and Applications/Tao Qian	1.064	2006 年 314 卷 (2) 526-536 页	2006 年2月 15日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛	15	15	否
6	Fourier analysis on starlike Lipschitz surfaces/Journal of Functional Analysis /Tao Qian	1.254	2001 年 183 卷 (2) 370-412 页	2001 年7月 10日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛	17	17	否
7	Algorithm of Adaptive Fourier Decomposition/IEEE Transactions on Signal Processing/Tao Qian, Liming Zhang, Zhixiong Li	4.300	2011 年 59 卷 (12) 5899-59 06 页	2011 年9月 19日	Tao Qian	Tao Qian	钱涛 张立明 李志雄	13	17	否
8	Fourier Spectrum Characterization of Hardy spaces and Applications/Proc. Amer. Math. Soc./Tao Qian, Yuesheng Xu, Dunyan Yan, Lixin Yan, Bo Yu	0.679	2009 年 137 971 - 980 页	2009 年3月	Tao Qian	Tao Qian	钱涛 许跃生 燕敦验 颜立新 余波	10	10	是
合 计								114	132	

主要完成人情况表：

姓名	钱涛	排名	1	技术职称	教授
工作单位	澳门大学				
完成单位	澳门大学				
对本项目技术创造性贡献	本项目由项目完成人独立完成。				
曾获国家科技奖励情况	无				

知情同意证明

本人李如传，身份证号[REDACTED]

是《Analytic unit quadrature signals with non-linear phase/Physica D-Nonlinear Phenomena》文章的通讯作者 (Luoqing Li)。本人同意项目完成人钱涛使用该文章报奖, 并已知晓“获奖项目所用论文专著不得再次用于申报国家科技奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用”等有关规定。特此证明。

李书恒

2017/11/27