学校编码：10384　　分类号_____密级_____

学号：33320140154296　　UDC_____

厦门大学

博 士 学 位 论 文

时空编码磁共振成像和化学交换饱和转移成像新方法

Novel methods for spatiotemporally encoded single-shot MRI and chemical exchange saturation transfer MRI

陈 林

指导教师姓名：蔡淑惠教授

专 业 名 称：电磁场与微波技术

论文提交日期：2017 年 10 月

论文答辩时间：2017 年 12 月

学位授予日期：　　年　　月

答辩委员会主席：

评　　阅　　人：

2017 年 12 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（　　）课题（组）的研究成果，获得（　　）课题（组）经费或实验室的资助，在（　　）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

本人声明该学位论文不存在剽窃、抄袭等学术不端行为，并愿意承担因学术不端行为所带来的一切后果和法律责任。

声明人　（签名）：

指导教师（签名）：

年　　月　　日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(　　)1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于年　月　日解密，解密后适用上述授权。

(　　)2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年　　月　　日

作者姓名：陈 林

论文题目：时空编码磁共振成像和化学交换饱和转移成像新方法

作者简介：陈 林，男，1990 年 4 月出生，2014 年 9 月师从厦门大学蔡淑惠教授，于 年 月获得博士学位。

中 文 摘 要

时空编码磁共振成像(spatiotemporally encoded MRI, SPEN MRI)是一种新型的超快速磁共振成像技术。该方法保留了回波平面成像序列快速采样的特性，并能够有效地克服不均匀磁场和化学位移引起的畸变或伪影，有着广阔的临床应用前景。由于特殊的二次相位编码机理，SPEN MRI 图像不能通过常规的快速傅里叶变换进行图像重建。超分辨率重建(super-resolved reconstruction, SR)是针对 SPEN MRI 方法提出的一种数据后处理技术，它可以在不增加采样点数的情况下，极大地提高 SPEN MRI 图像的空间分辨率。目前存在很多 SR 算法，例如共轭梯度法、部分傅里叶法、去卷积法和基于压缩感知的混合重建算法。这些算法都能有效提高 SPEN MRI 的空间分辨率，然而均未达到理论上最优的空间分辨率。

本文提出了一种最优的 SR 重建算法——SEED (super-resolved enhancing and edge deghosting)。SEED 算法充分利用 SPEN MRI 的二次相位信息，能够无损地恢复出理论上最优的空间分辨率。此外，SEED 算法还能和多扫描 SPEN MRI 结合，在减少一半采样点数的情况下恢复出与全采样质量相当的图像，从而加快多扫描的成像速度。

与笛卡尔采样相比，非笛卡尔采样具有采样效率高、采样方式灵活和抵抗欠采样混叠伪影等一系列优点，然而目前与非笛卡尔 SPEN MRI 相关的研究还非常少。本文首次提出了非笛卡尔 SPEN MRI 采样轨迹和采样梯度的设计方法，并根据 SPEN MRI 的特点提出了一种高效的非笛卡尔 SR 算法。与笛卡尔 SPEN MRI 相比，非笛卡尔 SPEN MRI 能够有效提高图像空间分辨率，减少欠采样引起的混叠伪影，获得质量更优的图像。此外，我们还针对非笛卡尔 SPEN MRI 的特性，

提出了一种非参考扫描的畸变校正技术和不均匀弛豫加权的校正技术，这些校正方法可以进一步提高非笛卡尔 SPEN MRI 的图像质量。

化学交换饱和转移（chemical exchange saturation transfer, CEST）磁共振成像是一种新型的分子影像技术。由于其能够无损检测活体中低浓度的蛋白质和代谢物，CEST 技术在最近十几年得到了蓬勃的发展。目前 CEST 已经成功地应用于许多领域，例如人脑神经系统疾病、动物模型的大脑局部缺血以及人体和动物模型的肿瘤。然而 CEST 方法存在一个很严峻的挑战：缺乏特异性，很难从 Z 谱中提取和定量分析特定代谢物的 CEST 信号。

为了解决 CEST 面临的挑战，本文提出一种基于偏共振变延迟多脉冲的 CEST 成像新技术。结合基于 Bloch 方程的数据拟合技术，该技术可以有效地分离提取 Z 谱中快速和慢速交换质子的贡献。

此外，本文还提出一种局部洛伦茨线型拟合方法。该方法可用于分离高场下 Z 谱中的总肌酸信号。结合活体磁共振波谱技术的校正，该方法可用于定量分析大脑中的总肌酸信号，获得大脑总肌酸分布图。

关键词：磁共振成像；时空编码；化学交换饱和转移

Novel methods for spatiotemporally encoded single-shot MRI and chemical exchange saturation transfer MRI

Abstract

Spatiotemporally encoded MRI (SPEN MRI) is a recently proposed ultrafast technique. Compared to EPI, SPEN MRI remains the outstanding performance in imaging speed, while possesses much better resistance to inhomogeneous B_0 field and chemical shift effects. The advantages of SPEN MRI show enormous potential in clinical applications. Limited by the quadratic phase encoding, the data of SPEN MRI cannot be directly reconstructed through conventional fast Fourier transform. Super-resolved reconstruction (SR) is a data post-processing method designed for SPEN MRI aiming at improving spatial resolution without additional acquisition. To date, many SR algorithms have been proposed, such as conjugate gradient, partial Fourier transform, de-convolution algorithm and compressed sensing based reconstruction. Though these algorithms can improve the spatial resolution to some extent, the images reconstructed by these algorithms do not reach the optimal resolution in theory. In this thesis, we proposed an optimal SR algorithm SEED (super-resolved enhancing and edge deghosting). SEED algorithm can retrieve the optimal resolution in theory by fully exploiting the quadratic phase encoding information. Besides, SEED can also be applied to multi-shot SPEN MRI, which can reduce half of acquisition points without obvious degradation in image quality.

Compared to Cartesian sampling scheme, non-Cartesian sampling has a great advantage in sampling efficiency and feasibility, resistance to aliasing artifacts induced by undersampling. However, few studies relating to non-Cartesian SPEN MRI have been carried out so far. In this thesis, we firstly proposed a method to design the sampling trajectory and decoding gradient for non-Cartesian SPEN MRI. A simple and efficient non-Cartesian SR algorithm was also proposed for non-Cartesian SPEN MRI, which can greatly improve the image resolution. Compared to Cartesian

SPEN MRI, non-Cartesian SPEN MRI can yield better image quality in regard of spatial resolution and aliasing artifacts. In this thesis, we also carried out a feasibility study on referenceless geometric distortion correction and T_2^* relaxation correction for non-Cartesian SPEN MRI, which will benefit the image quality of non-Cartesian SPEN MRI.

Chemical exchange saturation transfer (CEST) MRI, as a novel molecular imaging technique, has received great attention in recent years because of its potential to detect low concentration proteins and metabolites in vivo. The technique has been successfully applied to detect pathological chemical changes in many diseases, such as neurological disorders in human brain, animal models of cerebral ischemia and cancer in both animal models and humans. Though there are many successful applications, CEST MRI suffers from the lack of specificity in the Z-spectrum of endogenous exchanging protons.

In this thesis, we proposed a new CEST technique based on off-resonance variable delay multi-pulse. Combined with the fitting based on Bloch equation, this novel method can be used to separate out the fast- and slow-exchanging components in the Z-spectrum.

Besides, we proposed a localized lorentzian line-shape fitting method to extract the creatine signal in the Z-spectrum under 11.7 T. Combined with in vivo MRS, this method can be used to quantify the creatine signal and obtain the creatine concentration. A high-resolution creatine map was obtained via this method.

Key words: Magnetic resonance imaging (MRI); Spatiotemporal encoding; Chemical exchange saturation transfer (CEST)

目　录

Content