

# SMS-pMRI国内外研究进展

Henry

2022 年 2 月 17 日

## 1 介绍

多层同时激发(Simultaneous multi-slice (SMS)) MRI技术在一次测量中可以得到多张切片的叠加数据。一般情况下，都会使用CAIPIRINHA[1]技术用以改善多切片的混叠现象，以便改善后续的重建图像质量。主要使用一种相位调制(phase modulate)的方法，将不同切片之间分开。

SMS又称为MultiBand(MB)，应用CAIPIRINHA技术后的SMS(MB)数据 $y$ 可以写成：

$$y = \sum_{z=1}^{N_s} P_z y_z \quad (1)$$

其中 $y_z$ 表示第 $z$ 个切片的k-空间数据， $P_z$ 是对应于第 $z$ 个切片的相位调制矩阵， $N_s$ 表示同时激发的切片数量。

如果写成SENSE类的问题模型，式子(1)可以重新写为：

$$y = \sum_{z=1}^{N_s} U_z P_z F S_z x_z \quad (2)$$

其中 $x_z$ 表示第 $z$ 个切片图像， $S_z$ 是第 $z$ 个切片的灵敏度信息， $F$ 表示傅里叶变换， $U_z$ 是欠采样模式(对每一个切片是否需要欠采样，我问了梁栋他们，他们回答说是不一定，看数据构造方式)。

## 2 国内外研究现状

pMRI通过多线圈成像技术已经极大的提高了MRI成像速度，但是成像速度仍然是MRI发展的一大瓶颈，因此多层同时激发技术被提出，该技术通过同时激励多个切片，使用多线圈采集技术同时接收多个切片数据，由此也得到了多个切片的混叠数据。在[2]一文中提出使用多线圈技术分离同时激发的切片，该文主要说明了每一个SMS的线圈数据是不同切片与线圈灵敏度的线性组合，从而可以通过求矩阵逆的方法分离多切片。但是相邻切片同一个线圈的灵敏度信息非常相似，因此会出现矩阵奇异的情况，为了有效解决这个问题，在[1]提出了Controlled Aliasing in Parallel Imaging Results in Higher Acceleration (CAIPIRINHA)，该技术通过移动相位的方法，可以有效的改变混叠的位置，以减少并行成像技术对线圈阵列的依赖，降低灵敏度矩阵奇异的可能性。例如，如图1所示，是两张切片混叠的SMS图像，图2是经过CAIPIRINHA技术后的SMS图像，其中相位偏移分别是0和 $\pi$ ，对比这张图可以看出，在图2中两张切片经过偏移后已经不存在叠加的情况，此时可以比较容易的重建出切片图像。

基于CAIPIRINHA技术采集得到的SMS数据，传统的重建方法有SENSE/GRAPPA[3], slice-GRAPPA(SG)[4]等。SENSE/GRAPPA方法结合SENSE和GRAPPA的优势，将SMS重建问题分解成可以使用常规的一维GRAPPA解决的问题，SENSE/GRAPPA处理流程如图3所示。此时有同时激发的切片数量 $N_s = 2$ ，首先将两张切片的低分辨率图像沿着相位编码(PE)方向进行拼接，之后将得到的扩展图像矩阵进行傅里叶变换得到扩展的k-空间数据，之后使用传

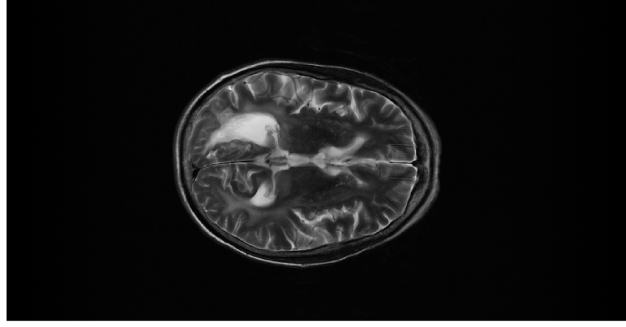


Figure 1: SMS

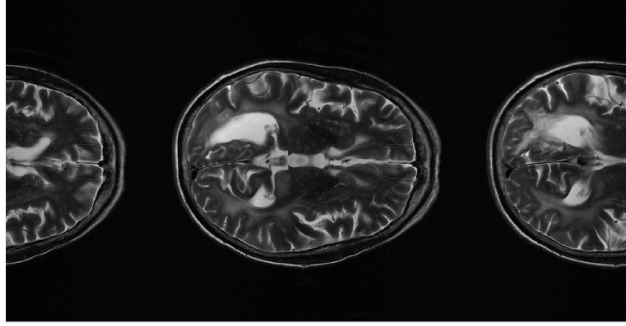


Figure 2: CAIPIRINHA SMS( $0 \pi$ )

统GRAPPA算法计算用以重建的kernel，最后对SMS叠加的k-空间数据使用GRAPPA算法进行重建，即可以得到两张重建切片图像。

Slice-GRAPPA算法的处理流程如图4所示，其算法思想总体与单个切片的GRAPPA类似，但是它为每一个切片都会估计出一组kernel，而且与传统的GRAPPA内核对获取的k-空间数据进行操作以填充缺失的行不同，slice-GRAPPA内核为给定切片的每个线圈创建一组全新的k-空间数据。但是SG算法对不同层混叠后出现的伪影处理仍不够具有鲁棒性，因此在文[5]中提出了Split slice-GRAPPA(SP-SG)，作者通过使用一个新的核拟合函数，得到了更具有鲁棒性的kernel，因此可以重建出质量较高的切片图像。文章[6]进一步优化了kernel的拟合函数，提出coil-combined split slice-GRAPPA(CG-SSG)。文[7]基于SP-SG算法，并且结合图像域正则化的方法，提出了regularized image domain split slice-GRAPPA(RI-SSG)，作者使用了具有显式灵敏度信息的SMS正向模型，并且对多切片图像进行TV正则化，最后在最小二乘的意义下求解模型。

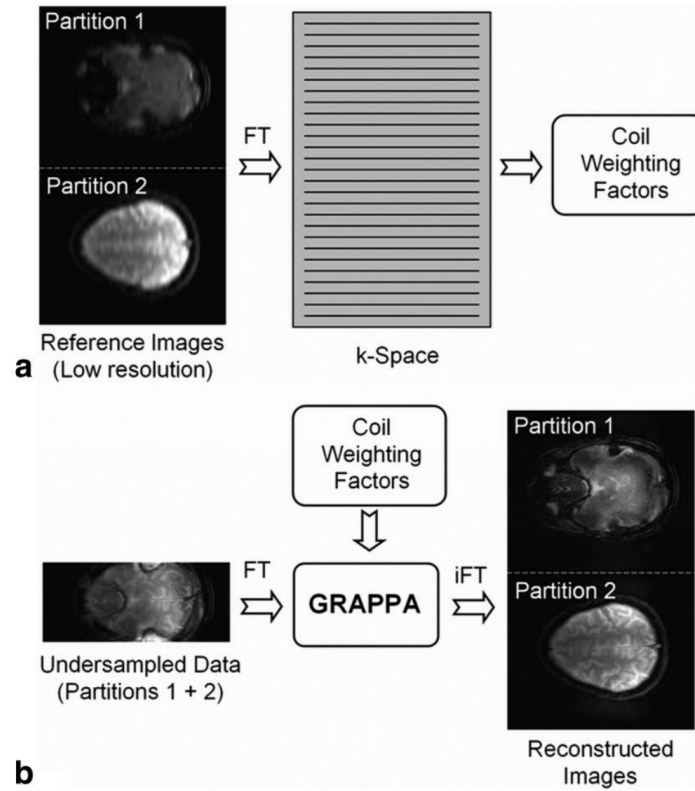


Figure 3: SENSE/GRAPPA

## References

- [1] Felix A Breuer, Martin Blaimer, Robin M Heidemann, Matthias F Mueller, Mark A Griswold, and Peter M Jakob. Controlled aliasing in parallel imaging results in higher acceleration (caipirinha) for multi-slice imaging. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 53(3):684–691, 2005.
- [2] David J Larkman, Joseph V Hajnal, Amy H Herlihy, Glyn A Coutts, Ian R Young, and Gösta Ehnholm. Use of multicoil arrays for separation of signal from multiple slices simultaneously excited. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 13(2):313–317, 2001.
- [3] Martin Blaimer, Felix A Breuer, Nicole Seiberlich, Matthias F Mueller, Robin M Heidemann, Vladimir Jellus, Graham Wiggins, Lawrence L Wald, Mark A Griswold, and Peter M Jakob. Accelerated volumetric mri with a sense/grappa combination. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 24(2):444–450, 2006.
- [4] Kawin Setsompop, Borjan A Gagoski, Jonathan R Polimeni, Thomas Witzel, Van J Wedeen, and Lawrence L Wald. Blipped-controlled aliasing in parallel imaging for simultaneous multislice echo planar imaging with reduced g-factor penalty. *Magnetic resonance in medicine*, 67(5):1210–1224, 2012.

### slice-GRAPPA: method overview

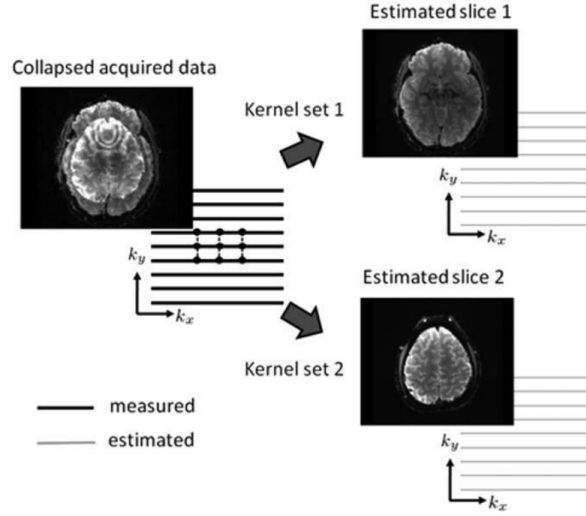


Figure 4: slice-GRAPPA

- [5] Stephen F Cauley, Jonathan R Polimeni, Himanshu Bhat, Lawrence L Wald, and Kawin Setsompop. Interslice leakage artifact reduction technique for simultaneous multislice acquisitions. *Magnetic resonance in medicine*, 72(1):93–102, 2014.
- [6] SK HashemizadehKolowri, Rong-Rong Chen, Ganesh Adluru, Leslie Ying, and Edward VR DiBella. Coil-combined split slice-grappa for simultaneous multi-slice diffusion mri. *Magnetic Resonance Imaging*, 66:9–21, 2020.
- [7] SK HashemizadehKolowri, Rong-Rong Chen, Ganesh Adluru, Douglas C Dean, Elisabeth A Wilde, Andrew L Alexander, and Edward VR DiBella. Simultaneous multi-slice image reconstruction using regularized image domain split slice-grappa for diffusion mri. *Medical Image Analysis*, 70:102000, 2021.