

磁共振多通道射频接收线圈性能评估

骆睿^{1,2} 胡小情² 陈潇² 李烨²

¹(武汉大学物理科学与技术学院微电子科学与工程系 武汉 430072)

²(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 磁共振成像技术追求高信噪比和快速扫描。与单通道线圈相比,多通道线圈具有高信噪比、高分辨率和成像速度快的特点。为服务于射频线圈设计和制作,开发了基于磁共振 k 空间数据的多通道射频线圈性能评估软件。此软件可以准确方便地计算多通道线圈噪声耦合矩阵和信噪比。

关键词 磁共振成像;多通道射频接收线圈;信噪比

中图分类号 TP 391 **文献标志码** A

Performance Evaluation of Multi-channel Radio Frequency Receiver Coils for Magnetic Resonance Imaging

LUO Rui^{1,2} HU Xiaoqing² Chen Xiao² LI Ye²

¹(*Department of Electronic Engineering, School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

²(*Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China*)

Abstract Magnetic resonance imaging (MRI) pursues high signal-to-noise ratio (SNR) and fast acquisition. Compared with single channel radiofrequency (RF) coil, multi-channel RF coils have the features of high SNR, high resolution and parallel imaging. One software for performance evaluation based on k -space data from multi-channel coils was developed, which serves to help the design and production of RF coils. Specifically, it facilitates to calculate the noise covariance matrix, SNR and geometry factor of multi-channel coils more precisely by using this software.

Keywords magnetic resonance imaging; multi-channel radio frequency coil; signal to noise ratio

1 引 言

磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 技术已经成为现代医学临床诊断中的重要

手段。射频接收线圈作为接收链的最前端,对成像质量起着至关重要的作用。线圈的性能直接影响到最终图像的信噪比。成像速度和信噪比是磁共振应用关注的重要指标。多通道射频接收

收稿日期: 2015-09-21 修回日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51307171、61571433、61401450); 广东省自然科学基金 (2014A030310200); 深圳市基础研究计划 (JCYJ20140610152828673); 中国科学院深圳先进技术研究院“优秀青年创新”基金 (201314)

作者简介: 骆睿, 本科生, 研究方向为微电子电路及射频技术; 胡小情, 博士, 助理研究员, 研究方向为磁共振射频技术; 陈潇, 硕士, 工程师, 研究方向为磁共振射频技术; 李烨 (通讯作者), 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 研究方向为磁共振射频技术, E-mail: liye1@siat.ac.cn.

线圈能够提供大视野(Field of View)和高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)^[1]。多通道射频接收线圈制作主要包含调谐、匹配,去耦以及失谐等基本过程^[2]。不同通道间磁耦合对多通道射频接收线圈性能有直接影响。一般通过面积重叠来减小相邻线圈单元之间的磁耦合,利用低输入阻抗的前置放大器来减小非相邻线圈单元之间的磁耦合。多通道线圈单元间去耦可以利用矢量网络分析仪对线圈的散射参数(Scattering Parameter, 简称 S 参数)进行实际测量。然而,在实际射频接收线圈的应用过程中,直接测量线圈的 S 参数不方便且操作繁琐。为了设计和制作性能满足实际需求的射频接收线圈,需要利用较为直观和精确的信噪比分布图评估射频线圈性能。

目前针对磁共振多通道射频线圈性能评估, Roemer 等^[1,3]给出信噪比的定义和计算公式; Kellman 等^[4]给出了根据噪声图像预估各通道间耦合性能的方法; Pruessmann 于 1999 年提出 SENSE (Sensitivity Encoding) 并行成像方法^[5], 给出了多通道射频线圈并行成像能力评估指标——几何因子(Geometry Factor, G-factor)的计算公式。虽然这些研究给出了噪声耦合矩阵、信噪比和几何因子的数学表达式,但对于从事磁共振射频线圈开发的工程技术人员而言,需要对复杂数学公式进行编程以评估所开发线圈的性能。为了方便工程技术人员对射频线圈性能进行评估,本文开发磁共振多通道接收线圈性能评估软件包,通过输入磁共振实验中采集到的信号和噪声,获得多通道线圈的各通道间噪声耦合情况和线圈信噪比分布图,从而对线圈性能进行评估,进而服务于射频线圈的设计和制作。

2 软件包架构和功能

本软件主要包含 k 空间(k -space)数据采集、噪声耦合矩阵估计、信噪比计算和 G-factor 的计

算四个部分。

2.1 数据采集

磁共振多通道射频线圈性能评估需要采集感兴趣区域的信号和噪声。根据实际应用情况,一般采集二维不同方位的多通道射频接收线圈各个通道的信号和噪声图像。采集多通道射频接收线圈各个通道的噪声时,射频发射电压设置为零。利用磁共振系统采集原始 k 空间数据。

2.2 噪声耦合矩阵计算

多通道线圈噪声耦合系数是用来描述各通道间磁通量耦合的大小。这里一般采用预扫描的方式得到不施加射频脉冲时的噪声数据。噪声耦合矩阵 Ψ 能同时从多通道射频线圈采集到的噪声数据来估计,计算公式如下:

$$\psi_{ij} = (1/N) \sum_{k=1}^N n_i^*(k) n_j(k) \quad (1)$$

其中, ψ_{ij} 是矩阵 Ψ 中的元素,对应第 i 和 j 通道噪声耦合; $n_i(k)$ 是零均值的第 i 通道噪声图像; N 是噪声图像像素点总数。

2.3 信噪比计算

多通道线圈信噪比的计算采用了一种最优结合各个通道中的信号与噪声数据的阵列计算方法,其由 Kellman^[6]在 2005 年最先提出。本文基于这种以像素为基础的 SNR 优化计算方法,同时考虑到空间振幅变化和敏感图像间的相对相位变化。通过噪声耦合矩阵可以知道各个通道间噪声叠加情况。假设所测量每通道信号图为 $S_i = (x, y, z)$, 对于给定的像素,根据噪声耦合矩阵可以得到线圈敏感度矢量 C 和测量信号电平 S 。以信噪比最优为目标,各个通道图像最终合成一幅图像 I 。其中, I 是组合所有通道图像归一化加权和。令加权系数为矢量 W , I 可以表示为:

$$I = \lambda W^H S \quad (2)$$

其中, λ 是一个随着函数位置变化的归一化常数。如果噪声协方差相等且不相关(Ψ 是单位矩

阵), 那么 $W=C$, 于是可得:

$$I=\lambda C^H S \quad (3)$$

为了构造一个不随空间位置变化的加权系数, λ 可选择为:

$$\lambda=(C^H C)^{-1/2} \quad (4)$$

在多通道射频线圈中, 考虑到不同通道间噪声的相关性, 令 $W=\Psi^{-1}C$ 时合成图像有最优信噪比, 相应表达式如下:

$$I^{\text{opt-SNR}}=\lambda C^H \Psi^{-1} S \quad (5)$$

加权系数 λ 变为:

$$\lambda=(C^H \Psi^{-1} C)^{-1/2} \quad (6)$$

如果每个通道中的信噪比很高, 那么线圈的敏感度矩阵 C 就会和信号矢量 S 非常接近, 即线圈敏感度本质上就是有最优信噪比图, 故不需要测量线圈敏感度矢量 C 。当噪声协方差与单位矩阵成正比, 可以得到平方和开平方根方法。

$$I^{\text{SoS}}=\sqrt{S^H S} \quad (7)$$

这个公式非常有用, 因为不需要经过预扫描可以得到 C 或 Ψ 。利用每一个通道图像的平方和再开平方就可以得到信噪比的估计。另外, 在没有射频激励时, 通过噪声图像就能获得噪声耦合矩阵。利用协方差加权: $I^{\text{cov-rSoS}}=\lambda S^H \Psi^{-1} S$, $\lambda=(S^H \Psi^{-1} S)^{-1/2}$, 化简可得:

$$I^{\text{cov-rSoS}}=\sqrt{S^H \Psi^{-1} S} \quad (8)$$

给出加权值 W , 则图像的信噪比可表示为:

$$SNR=\frac{W^H S}{\sqrt{W^H \Psi W}} \quad (9)$$

对于其他的组合方式, 所得信噪比可表示为:

$$SNR^{\text{SoS}}=\frac{S^H S}{\sqrt{S^H \Psi^{-1} S}} \quad (10)$$

而对于噪声 Cov-SoS 得到的图像信噪比为:

$$SNR^{\text{cov-rSoS}}=\sqrt{S^H \Psi^{-1} S} \quad (11)$$

这种方法得到的协方差加权后的图像信噪比和图像本身一致。

3 软件包使用实例

下面以 24 通道头线圈性能评估为例, 着重说明本文开发的多通道射频接收线圈性能评估软件的结构模块和使用步骤。打开软件包 Matlab 程序, 运行后, 数据输入界面如下图 1 所示。其中, Raw data 栏左上角 signal 1 和 noise 1 对应输入 24 通道头线圈采集到的信号和噪声。为了与 32 通道头线圈进行比较, 左上角 signal 2 和 noise 2

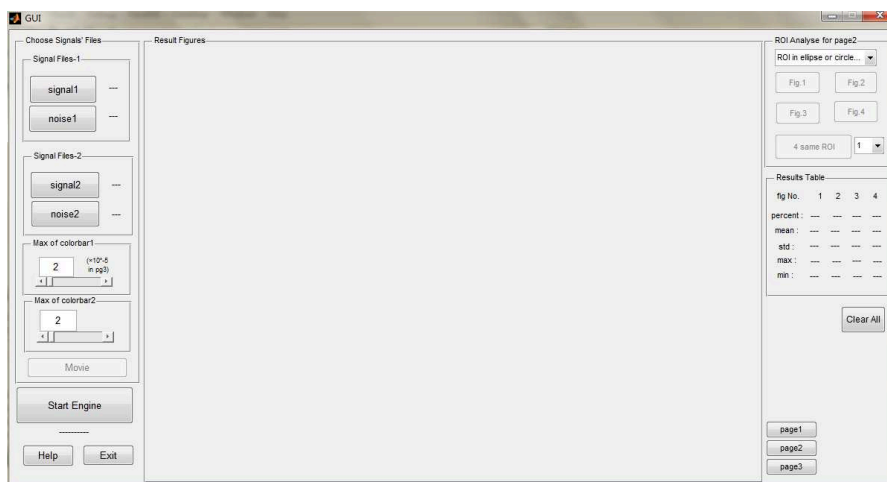


图 1 k 空间数据输入界面

Fig. 1 The interface of k space data input

对应输入 32 通道头线圈采集到的信号和噪声。

点击界面左边 Raw data 栏可依次输入 24 通道和 32 通道头线圈信号和噪声, 点击 Start 开始计算。根据噪声图像, 首先得到噪声耦合矩阵如图 2 所示, 其中噪声相关矩阵 1 和噪声相关矩阵 2, 左边 Max of colorbar 功能区调节图像的显示比例。点击右侧 Noise Matrix 分别得到 24 通道头线圈和 32 通道头线圈的噪声耦合矩阵。从图 2 噪声相关矩阵可以看出, 32 通道头线圈通道间耦合

相对较小。噪声相关矩阵 Φ 可以由噪声耦合矩阵 Ψ 按照下面计算公式得到:

$$\Phi_{ij} = \frac{\Psi_{ij}}{\sqrt{\Psi_{ii} \cdot \Psi_{jj}}} \quad (12)$$

点击 SNR 可以显示 SoS (Sum of Square) 和 Cov-SoS (Covariance Sum of Square) 两种重建方法的信噪比, 如图 3 所示。调节比例大小 (Max of colorbar) 为 750, 可得两种重建方法的 SNR 图。从图 3 可以看出, 采用 Cov-SoS 重建的

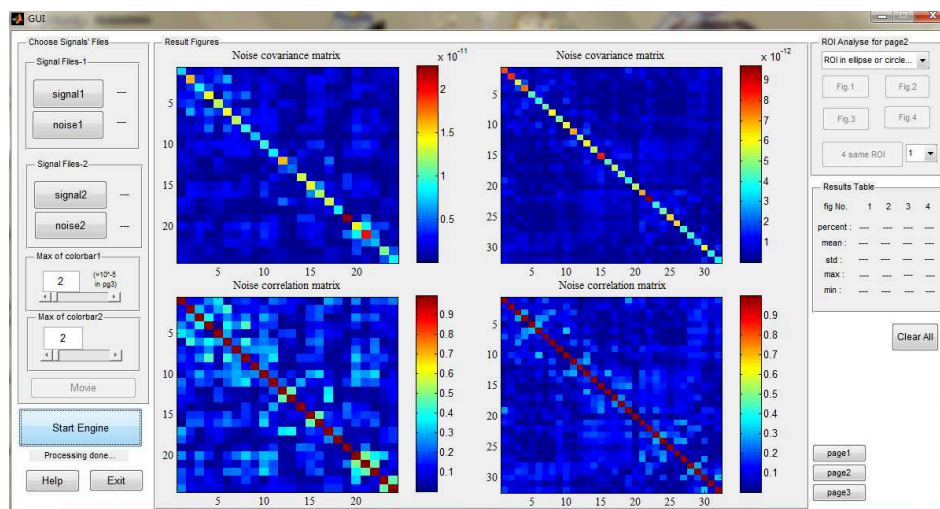


图 2 噪声耦合和相关矩阵

Fig. 2 The noise covariance and correlation matrix

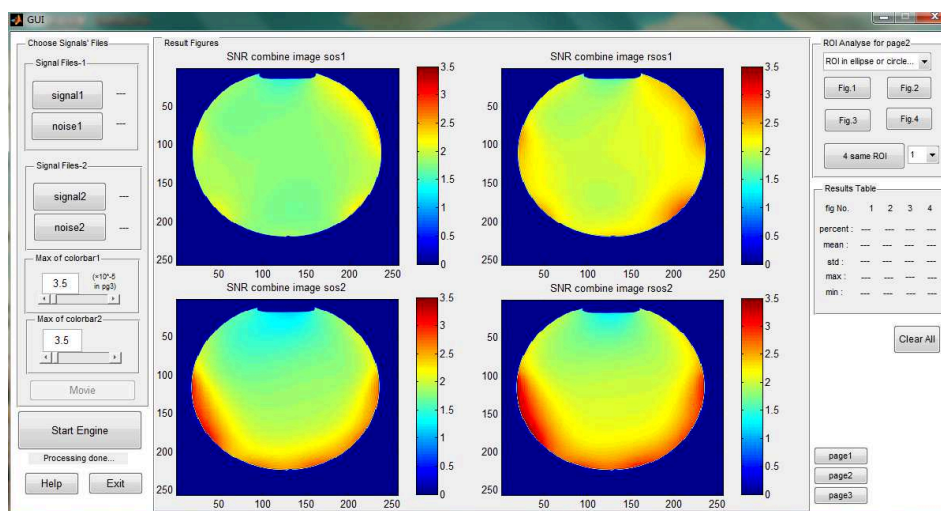


图 3 两种重建方法的信噪比图

Fig. 3 The SNR maps of two reconstruction methods

SNR(右)比纯粹 SoS 要高(左), 并且 32 通道头线圈的 SNR 在水模的边界相对比较大(如图 3 所示)。

从上面的演示可以看出, 该软件只需要输入采集到的多通道射频线圈原始数据, 就可以获得通道间耦合情况和信噪比的分布图。这方便工程技术人员更加快速有效评估射频线圈的性能。

4 结 论

为了方便工程技术人员实现多通道射频接收线圈的性能评估, 本文基于复杂数学公式, 开发了多通道射频线圈性能评估软件。利用实际采集 24 通道和 32 通道头线圈的数据, 演示线圈性能评估软件的使用。目前市面上已有商业软件包(Speag 公司 Musaik 软件包)对多通道射频接收线圈的性能进行评估, 其主要是基于电磁场数值仿真得到各个通道接收磁场和电场空间分布。根据接收磁场得到各个通道接收图像, 同时利用电场分布来计算噪声耦合矩阵, 最终计算得到 SNR 分布。仿真结果和实际应用会存在一定误差。然而本文开发软件是基于磁共振成像系统采集的未经过任何滤波和处理的原始数据来计算噪声耦合矩阵和 SNR, 相对更加准确和简单。

致谢

在论文的写作过程中, 实验室的工程师罗超给予了很大的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Roemer PB, Edelstein WA, Hayes CE, et al. The NMR phased array [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1990, 16(2): 192-225.
- [2] Fujita H, Yang XY, Finnerty MJ, et al. RF surface receive array coils: the art of an LC circuit [J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2013, 38(1): 12-25.
- [3] Keil B, Wald LL. Massively parallel MRI detector arrays [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2013, 229: 75-89.
- [4] Kellman P. Image reconstruction in SNR units: a general method for SNR measurement [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2007, 58(1): 211-212.
- [5] Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, et al. SENSE: sensitivity encoding for fast MRI [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1999, 42(5): 952-962.
- [6] Kellman P, Mcveigh ER. Image reconstruction in SNR units: a general method for SNR measurement [J]. *Magnetic Resonance Medicine*, 2005, 54(6): 1439-1447.