

参数对脉冲核磁共振信号图像的影响分析

Analyzing the effects of parameters on NMR images

金磊 08300190015 指导老师:俞熹

复旦大学 物理系

摘要

本文主要讨论了脉冲核磁共振信号图像中各种参数的物理意义,从实验原理出发,根据 NMI20 核磁共振仪实验软件,研究改变各参数对输出图像的影响,并总结出一些有效提高图像质量的参数选择方法。

关键词 核磁共振 脉冲序列 成像 参数选择

引言

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)是指处在外界恒定磁场为 B_0 的具有磁矩的原子核,产生能级分裂,若在垂直以 B_0 方向加一射频(Radio Frequency, RF)场,当射频场的频率等于相邻能级间的跃迁频率时(即满足)核磁矩产生磁偶极跃迁的现象。目前,核磁共振成像(NMRI)技术是医学中最重要的影像诊断手段之一。

本文主要讨论了脉冲核磁共振信号图像中各种参数的物理意义,结合实验原理,使用 NMI20 核磁共振仪实验软件,研究改变各参数对输出图像的影响,并总结出有效提高图像质量的参数选择方法。

实验原理

1. 核磁共振基本原理

置于磁场中的自旋核系统,具有宏观磁化矢量 Mz 。沿垂直于外场的方向施加一个频率与拉莫尔频率¹相同的射频电场 B_1 ,则宏观磁化矢量也将受到射频磁场作用,发生章动。在实验中可探测到射频脉冲使得磁化适量偏离 Z 方向一个角度 θ 。 $\theta = \gamma B_1 \tau$ ²。在垂直于外磁场的方向施加与质子拉莫尔频率相等的 90 度射频电磁波,即可使得宏观磁化矢量发生偏转,产生核磁共振成像,在垂直与原磁场方向放置探测横向(XY 平面内)磁感应强度的线圈,即可对核磁共振信号进行观察。所得信号即为本实验的主要研究对象。

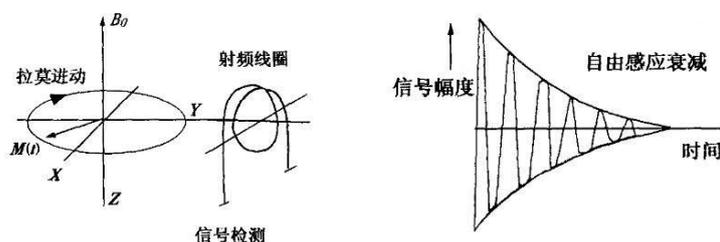


图 1

2. 硬脉冲和软脉冲

NMRI 中的射频磁场系统发射出中心频率为拉莫尔频率的射频电磁波,激发样品质子群从而

¹ 单个自旋核在磁场中的运动除了不断绕自身轴做转动之外,还以磁场为轴作进动,进动的频率满足公式 $\omega = \gamma \cdot B$, 其中的 ω 即是拉莫尔频率,射频磁场越接近总的拉莫尔频率,共振效果就越明显。

² 可知偏转角度取决于射频场的大小和射频脉宽 τ 。选择合适的射频场大小和射频脉宽,可找到使偏转角为 90 度和 180 度的射频脉冲,即实验中用到的 90 度脉冲和 180 度脉冲。

γ 为旋磁比,是质子的一个参数。

发生核磁共振效应。该电磁波并非为单一频率，而是以拉莫尔频率为中心频率具有一定宽度的频带。根据频带宽度的不同，可将射频电磁波分为硬脉冲和软脉冲。

射频脉冲是时间门控的高频载波信号，是时间域信号。载波频率即为频率源产生的拉莫尔频率，是一个单一频率的信号。门控信号脉冲序列发生器产生控制射频发射时序的信号。将硬脉冲时域信号进行傅立叶变换后，即得到其频率域信号波形，它是一个SINC (sin x/x) 函数形状。硬脉冲时间激发宽度较窄，但射频幅值较高，对应的频带较宽，可以激发较大范围的质子，选择性较差；软脉冲时间激发宽度较宽，但射频幅值较低，对应的频带较窄，只能激发较小进动频率范围的质子，选择性较好，核磁共振成像中常用，时域波形为SINC函数。

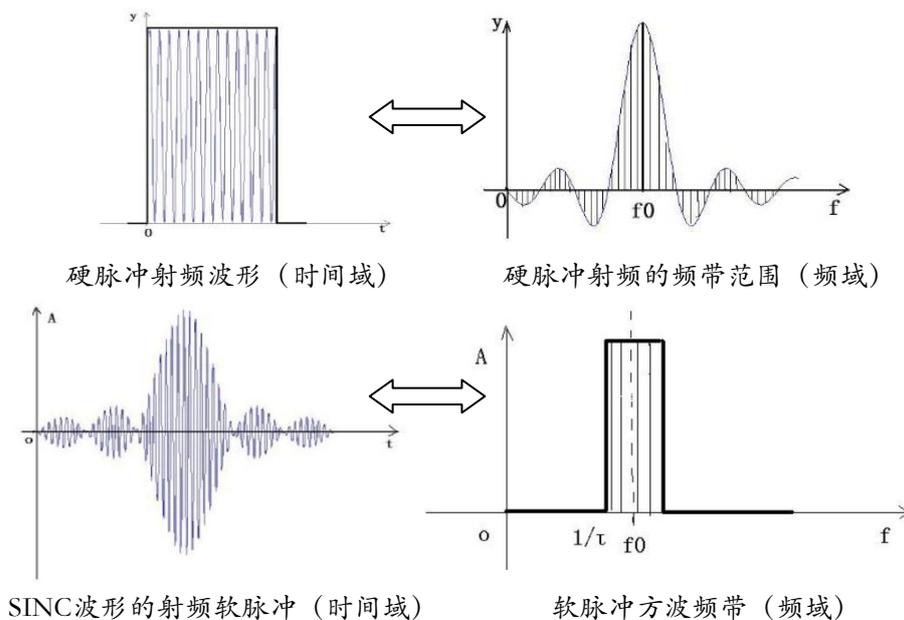


图2

实验器材

NM—2011梯度放大器、NM—2010射频单元、核磁共振成像分析仪NMI20—Analyst、计算机、试管、样品（大豆油、芝麻）。

实验测量结果与讨论

在开始测量前先利用机械匀场和电子匀场实验将主磁场均匀性调制到 5ppm 左右。然后确定了共振状态的中心频率为 22.372MHz。

对 10mm 高的大豆油样品测量以下序列信号。

1. 硬脉冲 FID 序列

1) TD 对 FID 图像的影响

下表表示采集点数 TD 为 512、1024、2048 而其它参数相同时的自由衰减信号 (FID) 图像改变情况。发现采样时间与 TD 成正比。

TD	采样时间 (ms)	P1=60.0 μ s , D3=100 μ s , SW=100.0KHz , SF1=22MHz , O1=371.00KHz RG=2 (保证信号不失真)
512	5	
1024	10	
2048	20	

采集参数主要包括采样点数TD，采样带宽SW，采样频率FW，计算点数SI。这四个参数之间是有相互关系的。采样点数和采样频率共同决定采样时间，即 $t=TD \times FW$ ， $SW=1/FW$ ，得到： $t=TD/SW$ 。因此改变采集参数，可以改变信号采集时间。采集时间对回波信号的采集也是有

影响的。当采样点数不变，采样频率增加一倍，则采集时间缩短一半；采样带宽较小一半，采集时间则增加一倍。

2) P1对FID图像的影响

保持其它参数不变，从小到大调节参数P1值，即 90° 脉冲宽度，FID信号的幅值经历了从小到大再到小的过程，记录下第一次幅值最大值为 $22.0\mu s$ ，对应 90° 脉冲射频。当 $P1=44.0\mu s$ 时，第一次达到最小值，此时的P1值对应 180° 脉冲。如图3所示， $P1'=2P1$ 。

红线和绿线分别代表 FID 实部和虚部两路信号，表示吸收线形和色散线形，相位差为 90° 度。

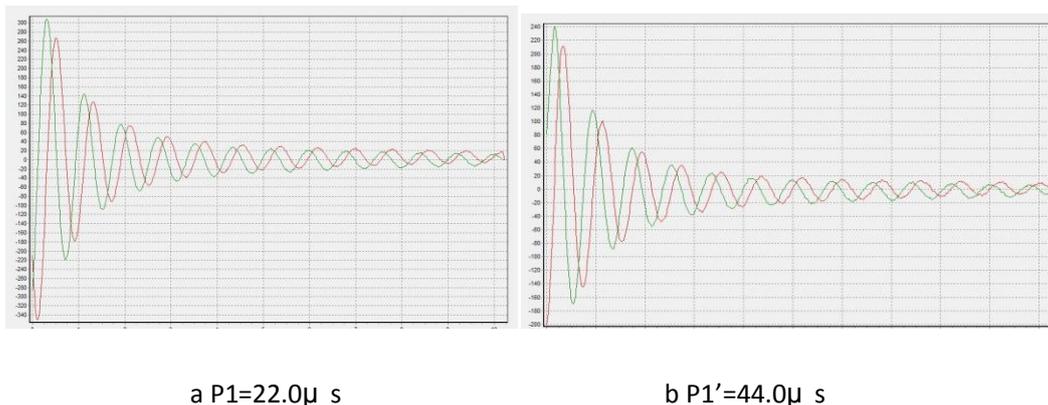


图 3

可以利用以下经典模型来解释此现象。

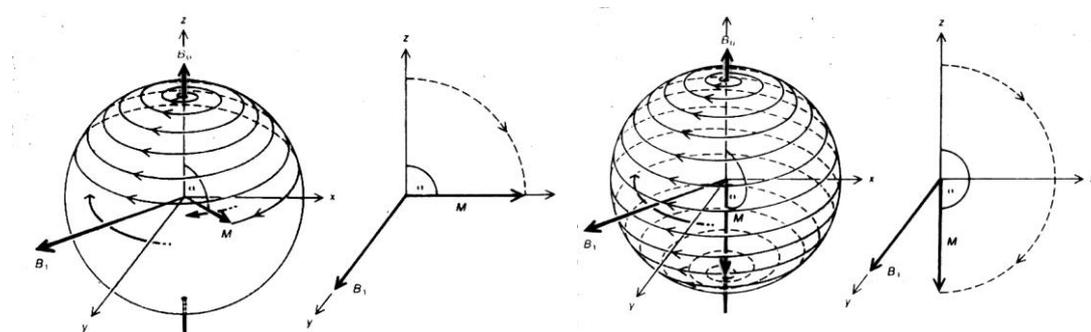


图4 90度脉冲与180度脉冲示意图

由于磁化矢量偏转 Z 方向的角度 $\theta = \gamma B_1 \tau$ ，实验中 P1 表征射频脉宽。同时，根据磁化矢量的弛豫规律以及法拉第电磁感应定律，接收线圈的感应电动势 $V(t) \propto M_0 \sin\theta \cos(\omega_0 t) e^{-t/T_2}$ 。因此 90° 度时横向磁化矢量最大，所以幅值达到极大，同理 180° 度所对应的幅值达到极小。

2. 软脉冲 FID 序列

1) 下表是改变软脉冲累加次数 NS 时，FID 信号的变化情况。

NS	2	4	6	8
幅值	600	1200	1800	2400
其它参数: SP1=1200 μs , D3=100 μs , TD=512, SW=100.0KHz, SF1=22MHz, O1=370.00KHz RG=2 (保证信号不失真), RFamp1=27.5%				

图 5

由表中数据可知信号幅值与 NS 成正比。随着累加次数上升，信号幅度会增强。在实验中，为抑制噪声的影响，采用的 NS 为 8。

2) 图 6 是改变射频结束到线圈开始接收信号之间的切换时间，即死时间 D3 时，FID 信号

的变化情况。经测量，随着 $D3$ 增大开始扫描信号时的初始相位越大，信号幅值大小基本保持不变。

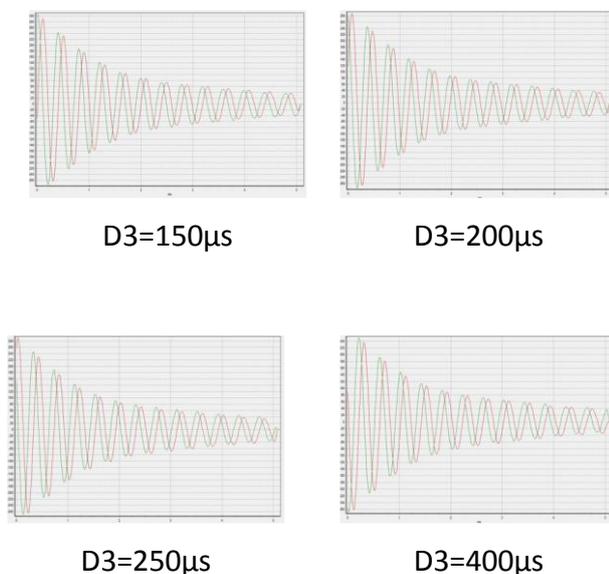


图 6

其它参数： $SP1=1200\mu s$ ， $TD=512$ ， $SW=100.0KHz$ ， $SF1=22MHz$ ， $O1=370.00KHz$ ， $RG=2$ ， $RFamp1=27.5\%$ ， $NS=8$ 。

3. 自旋回波序列成像

对2g芝麻样品进行成像时，固定其它参数如下：

$RFamp1(\%)=33.5\%$ ， $RFamp2(\%)=67\%$ （在软脉冲回波序列实验中确定，此时对应的回波信号幅值最大）， $TD=512$ ， $SW=100KHz$ ， $D1=1200\mu s$

改变磁场的梯度幅度，对芝麻横断面进行了扫描，图7的数字表示 $G_x-G_y-G_z$ 。采集过程中注意观察了回波信号幅值（特别是扫到中间时刻附近），优化增益值设置。同时关注仪器面板蓝灯，确认设置的梯度值不超过仪器额定值，以防止仪器烧坏。

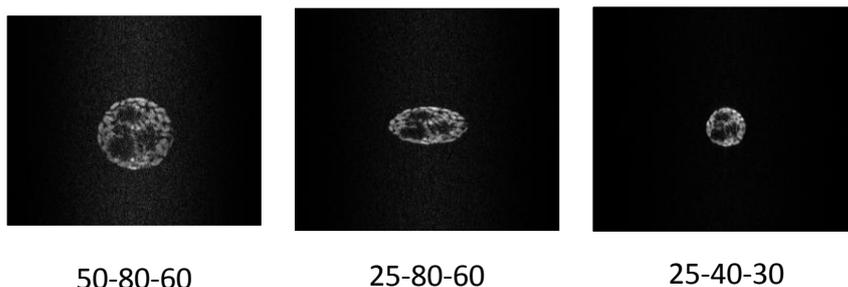


图 7 横断面质子密度成像图

由上述图像可知， G_x 、 G_y 可以改变图像的宽度和高度（相对值）。只有使 G_x 与 G_y 保持最合适的比例，才能使图像与实际样品保持相同比例和较好的分辨率。分析如下：

在 NMRI 中，利用梯度场系统产生的叠加在主磁场上的三维梯度磁场进行信号的空间定位，在功能上可以实现层面选择、相位编码和频率编码。

A. 选层梯度 G_z

在射频脉冲作用时才开启。具有特定频率的射频脉冲只使体内某一层面内氢质子产生磁共振。

B. 频率编码梯度 G_x

在接收信号期间开启。在层面上沿 x 方向施加一线性梯度场，使各列体素的磁共振信号频率

也发生变化。

C. 相位编码梯度G_Y

在频率编码梯度施加前的任意时刻施加。在层面上沿Y轴以不同强度反复NE次施加。同一行的体素处于相同磁场中，所以同一行中所有体素中质子进动速率相同，一段时间后造成各行间相位差，关闭后相位差仍保留下来。所以用相位差作为标记，区别Y轴方向上的不同行。选定的层厚 $\Delta Z = \Delta f / (\gamma G_Z)$ ，与射频带宽正相关，与梯度场强反相关，此时将只能激发质子进动频率在射频带宽范围之内的那个层面组织内的质子。

相位编码梯度和频率编码梯度在X和Y方向上产生的频率差值分别满足： $\gamma G_x \times X = \Delta \omega_x$ ， $\gamma G_y \times Y = \Delta \omega_y$ ，通过对信号进行频率范围的获取再与空间位置实现以一一一对应，因此G_x与G_y影响着图像与实物的纵横比例。

样品在图像中的大小与“视野”FOV (field of view) 有关。

$$(FOV)_x = SW / (\gamma G_x); \quad (FOV)_y = NE / (2D1 \times \gamma G_y)$$

当FOV越大时，样品在图像中越小。可见图像的宽度与G_x正相关，高度与G_y正相关。理论上最终图像矩阵为方阵，即 $SW / (\gamma G_x) = NE / (2D1 \times \gamma G_y)$ 时，图像形状不失真，但由于实际仪器的线圈与理论并非完全相同，所以需要进一步手动调节。

实验误差原因

1. 实验用的芝麻及大豆油可能不纯，含有杂质。
2. 实验仪器的匀场效果有限，导致原磁场在各个方向大小不一，影响共振信号，产生误差。

实验结论

根据实验结果可知：

- 1) TD、SW 共同决定采样时间，改变图像的横向位置。
- 2) RG、P1、NS、RFamp 等参数都影响着信号采样幅度，改变图像的纵向高度。
- 3) D3 影响 FID 信号初始相位。
- 4) 可以通过 G_x、G_y 改变二维图像大小、比例和分辨率

核磁共振技术的图像质量与多个参数相关。本文从分析成像原理开始，讨论参数的物理意义；然后对于所有参数进行整理、归类；最后总结了参数调节流程。由于实验设备高度封装且结构较为复杂，实验者需要对于其中各参数的意义非常明确，才能有效提高成像质量，并为借助仪器进一步探究做好铺垫。

致谢

感谢实验中心俞熹老师的认真指导，感谢实验合作者张文娟同学在实验过程中的互相帮助，让我在此次实验中受益颇丰。

参考文献

- 1) 《核磁共振成像技术实验教程》[M] 汪红志 张学龙主编 科学出版社 2008 年 1 月
- 2) 《近代物理实验》(第二版)[M] 戴道宣 戴乐山主编 高等教育出版社 2006 年 7 月
- 3) 《近代物理实验》[M] 吴思诚 王祖铨 北京大学出版社 2006 年 8 月
- 4) 《近代物理实验补充讲义》 复旦大学物理系