

实验三 旋转坐标系下的 FID 信号

一、实验目的：

- 1、了解并掌握 FID 信号的特点。
- 2、了解实验室坐标系和旋转坐标系下的 FID 信号的差别。
- 3、如何通过调整射频信号的幅度来改变射频脉冲角度。

二、实验器材：

约 10mm 高的大豆油试管样品；NMI 20 台式磁共振成像仪。

三、实验原理：

1、FID 信号

置于静磁场 B_0 中的质子群系统体现出沿主磁场方向（Z）的宏观磁化矢量 M ，垂直施加特定频率的 90° 射频脉冲 B_1 后，样品的宏观磁化矢量 M 以 B_1 为轴翻转到 XY 平面，形成一个横向的磁化矢量分量 M_{xy} 同时绕 Z 轴转动。射频场结束后，磁化矢量要恢复到原始 Z 方向，即弛豫过程。弛豫过程包括三个分过程：纵向磁化矢量的指数递增、横向磁化矢量的指数递减、绕主磁场的进动。在体外沿 XY 平面放置一个接收线圈，根据法拉第电磁感应定律，通过闭合回路的磁通量发生变化时，闭合回路内就会产生感生电压，感生电压的大小与磁通量的变化率成正比，接收线圈内就会产生感生电动势，这个感生电动势就是 MR 信号，其频率与拉莫尔频率相等，即 $V \propto M_{xy} \cdot \cos \omega_0 t$ 。

90° 射频脉冲停止后，磁化矢量发生弛豫，横向磁化矢量 M_{xy} 幅值按照指数规律 $M_{xy} = M_0 \sin q e^{-t/T_2^*}$ 自由衰减，接收线圈内感应出 MR 信号也呈现出按指数规律自由衰减，这个 MR 信号又称为 FID 信号 (Free Induction Decay)，因此 FID 信号的自由感应衰减规律可以表示为：

$$V_{FID} \propto M_0 \sin q \cos \omega t e^{-t/T_2^*}。$$

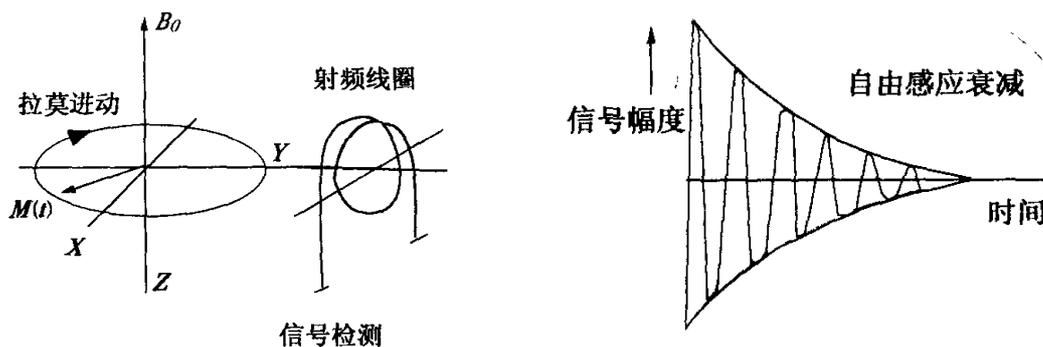


图1 FID 信号的检测及其衰减规律

2、旋转坐标系与实验室坐标系

FID 信号实质上是宏观磁化的综合运动所致。为了求解 FID 信号的数学表达式，就需要确定宏观磁化的动力学方程。根据布洛克假设，宏观磁化 M 的运动方程为：

$$\frac{dM}{dt} = g(M \times B) - \frac{iM_x + jM_y}{T_2} - \frac{M_z - M_0}{T_1} k$$

对于磁共振成像， $B = B_0 + B_G + B_1$ ， B_G 为梯度场， i 、 j 、 k 分别为三维坐标轴；该运动方程就是建立在实验室坐标系下的方程。

要求解上述 Bloch 方程非常复杂，希望能简化。由于核磁矩在 B_0 场中一直绕 B_0 进动，在 z 方向的 M_0 并不进动。未受激励时，它沿 z 轴驻定不动。垂直于 z 轴方向施加射频场 B_1 且满足共振条件时， M 开始章动。 M 一旦离开 z 轴，就既有绕 B_0 的进动，也有绕 B_1 的章动，再加上 T_1 和 T_2 弛豫运动，整体运动过程看起来异常复杂。而接收线圈只能感受到垂直于 z 轴的 xy 平面内的宏观磁化的变化。基于此，有人就想到引入一个旋转坐标系，把绕 z 轴的进动当作背景减掉。

S 表示实验室坐标系 $Oxyz$ ； S' 表示旋转坐标系： $O'x'y'z'$ ；让 O 和 O' 重合， z 和 z' 重合， S' 以 $\omega \approx \omega_0$ 绕 z 轴旋转。当 $\omega = \omega_0$ 时，在 S' 坐标系中，将看不到质子绕 B_0 的进动，只看到绕 B_1 的进动，以及 T_1 和 T_2 弛豫运动。因此运动描述大为简化。

在旋转坐标系下的布洛克方程为：

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = M_y(\omega - \omega_0) - \frac{M_x}{T_2}$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} = -\omega_1 M_z - M_x(\omega - \omega_0) - \frac{M_y}{T_2}$$

$$\frac{\partial M_z}{\partial t} = M_y \omega_1 + \frac{M_0 - M_z}{T_1}$$

对旋转坐标系下的 FID 信号进行正交相位检波后，就产生了实部和虚部两路信号。其中实部为吸收线形（?：什么是吸收线形），为偶函数；虚部信号为色散线形（?: 什么是色散线形），为奇函数。在本实验设备中分别用红色线和绿色线表示。

3、硬脉冲

对于磁共振系统来说， 90° 射频脉冲是用来产生射频磁场 B_1 的脉冲，射频磁场 B_1 是驱动激励磁化矢量 M_0 ，从而产生 MR 信号的动力源，对于不同的射频脉冲形式，其产生的作用是不同的。硬脉冲是指一个具有时域窄、幅值强的矩形射频脉冲，其对应的频谱很宽，频谱的主瓣中央部分足以覆盖样品吸收谱的范围，该激发脉冲可以近似地把发射线圈所作用范围内的样品全部进行激励。因此，它不能用作层面选择，但可用于 NMR 波谱和三维成像中，它的特点是时宽很小，强度和功率很大。

4、硬脉冲 FID 序列

硬脉冲 FID 序列是采用 90° 硬脉冲后采集 FID 信号的序列，其序列形式如图 2 所示。该序列的作用主要有两个：观察 FID 信号和调整射频角度。序列图及各参数分别如下：

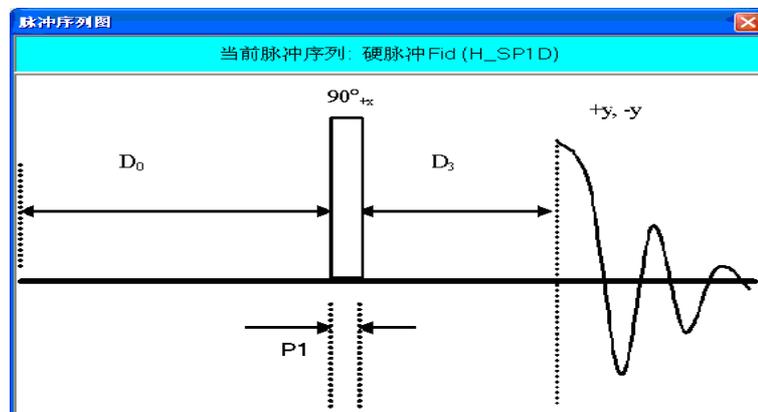


图 2 硬脉冲 FID 序列的序列形式

D0: 重复时间 TR;

D3: 死时间, 即 90° 射频结束到线圈开始采集信号之间的时间间隔;

P1: 90° 射频脉冲的施加时间;

四、实验步骤:

- 1、启动计算机, 点击桌面图标  进入到如图 2-1 界面。再点击  按钮进入 WinMRIXP 操作界面, 如图 2-2



图 2-1 核磁共振成像技术实验仪软件界面

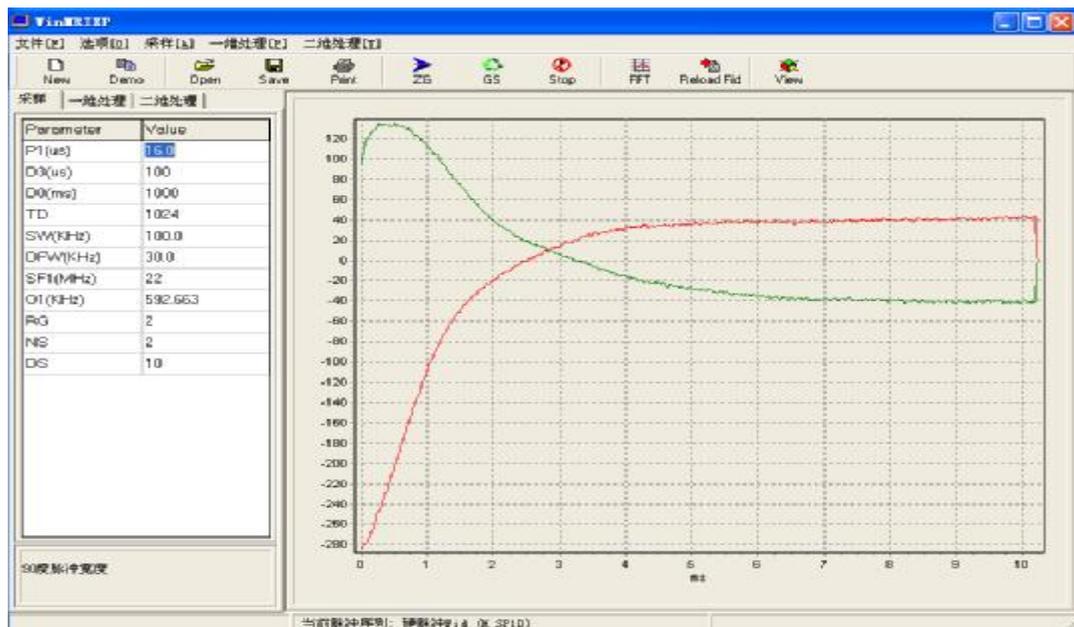


图 2-2 WinMRIXP 操作界面

- 2、将装有 10mm 高大豆油的样品管小心放置入磁体柜上方样品孔内。
- 3、开启射频单元及梯度放大器的电源(如下面两图)。



NM2010 射频单元面板



NM2011 梯度单元面板

- 4、重复实验一和实验二的内容，使系统处于磁共振实验状态。

(一) 观察旋转坐标系下的 FID 信号：

- 1、单击  按钮(见图 3),弹出 Demo Pulse Sequence 对话框(见图 4),选择硬脉冲 FID (H_SP1D), 点击 OK 按钮。硬脉冲序列图如图 4 所示。



图 3 WinMRXP 菜单栏

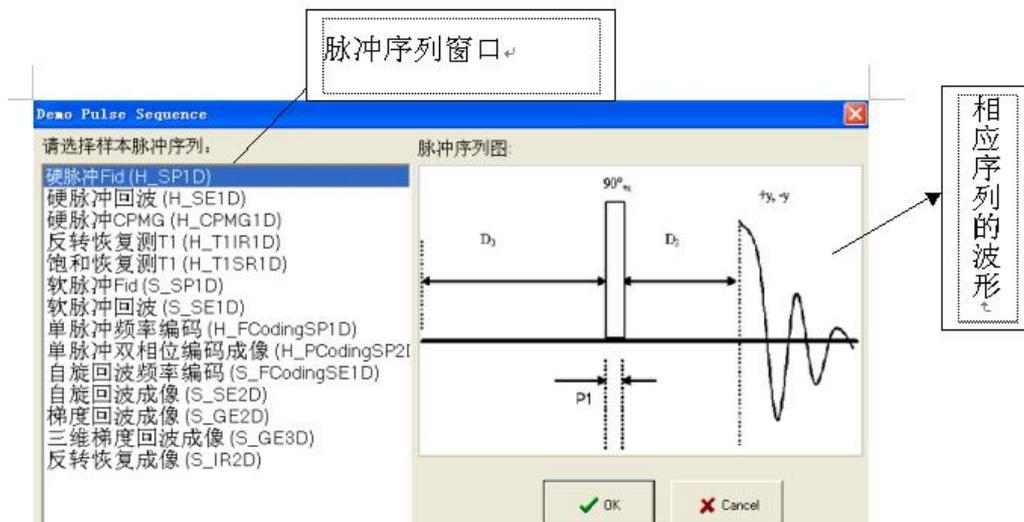


图 4 脉冲序列对话

2、设置射频频率 SF1=22, O1=607(见图 5)，一般频率设置要稍微偏离中心频率（以便观察到合适频率的 FID 信号），然后点击“GS”进行单次采集(见图 3)，即可观测到 FID 信号。如图 6 所示。

Parameter	Value	
P1(us)	60.0	90 度脉冲宽度
D3(us)	100	死时间
D0(ms)	1000	
TD	1024	采样点数
SW(KHz)	100.0	谱宽
DFW(KHz)	30.0	
SF1(MHz)	22	主频
O1(KHz)	607.000	偏移量
RG	4	
NS	8	
DS	10	增益调节

图 5 硬脉冲 FID 各参数

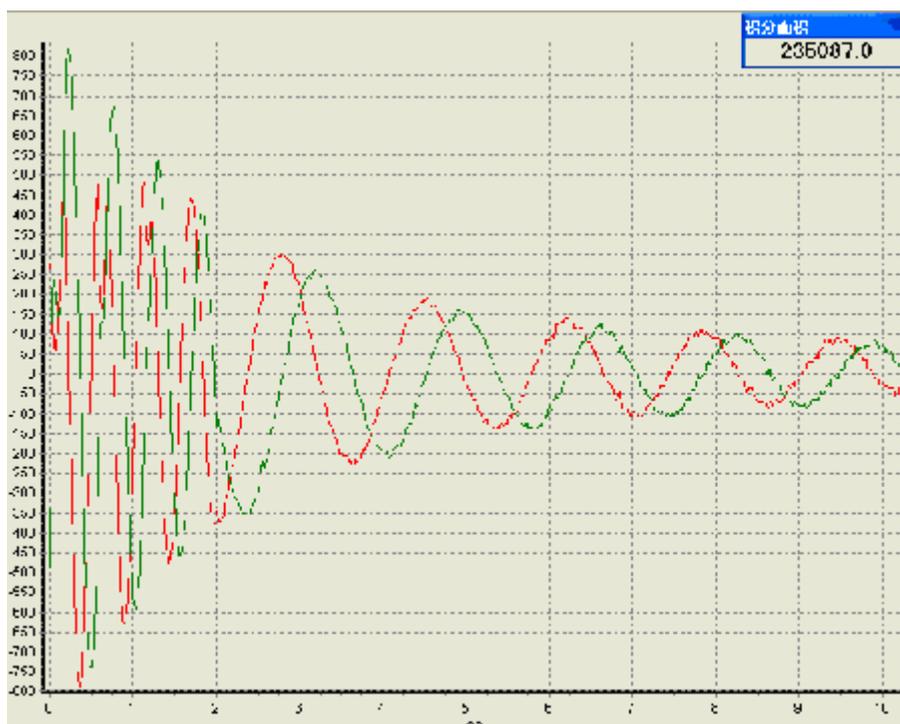


图 6

- 3、设置采集点数 TD(见图 5)分别为 512、1024、2048，观察 FID 信号的变化情况。图 7 是 TD 为 2048 时的 FID 信号。

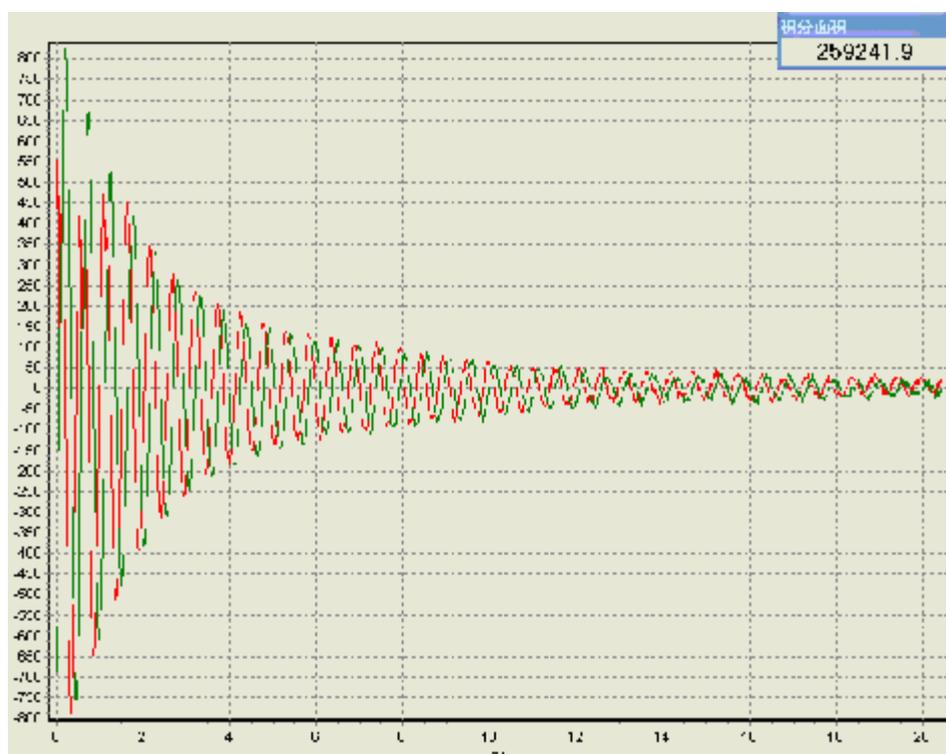


图 7

- 4、如果出现上图 6、7 中的失真现象，可以通过减小增益值, 即减小 RG

的值(见图 5)，来消除失真，消除失真后的图像如图 8 所示。自动增益调整的方法可参见实验 4。

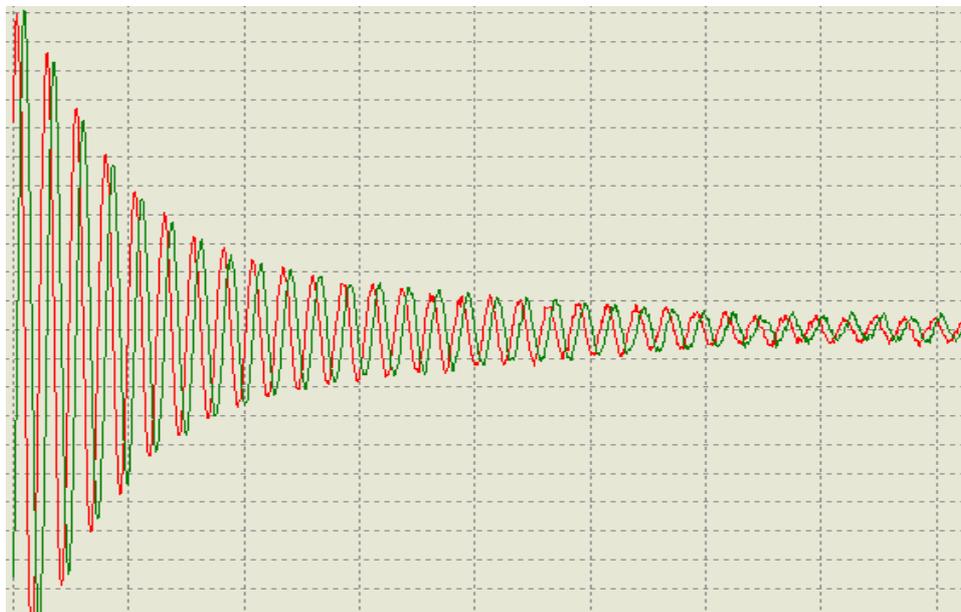


图 8

5、改变 P1 值，即 90 度脉冲宽度，从小到大逐步改变 P1 值，可以观察到信号的大小的改变规律(此处可只看信号模值)。最后纪录使得信号幅值最大的 P1 值,即为 90° 射频的脉冲幅值。如图 9、10、11 是 P1 为不同值时的 FID 信号，注意其幅值大小。

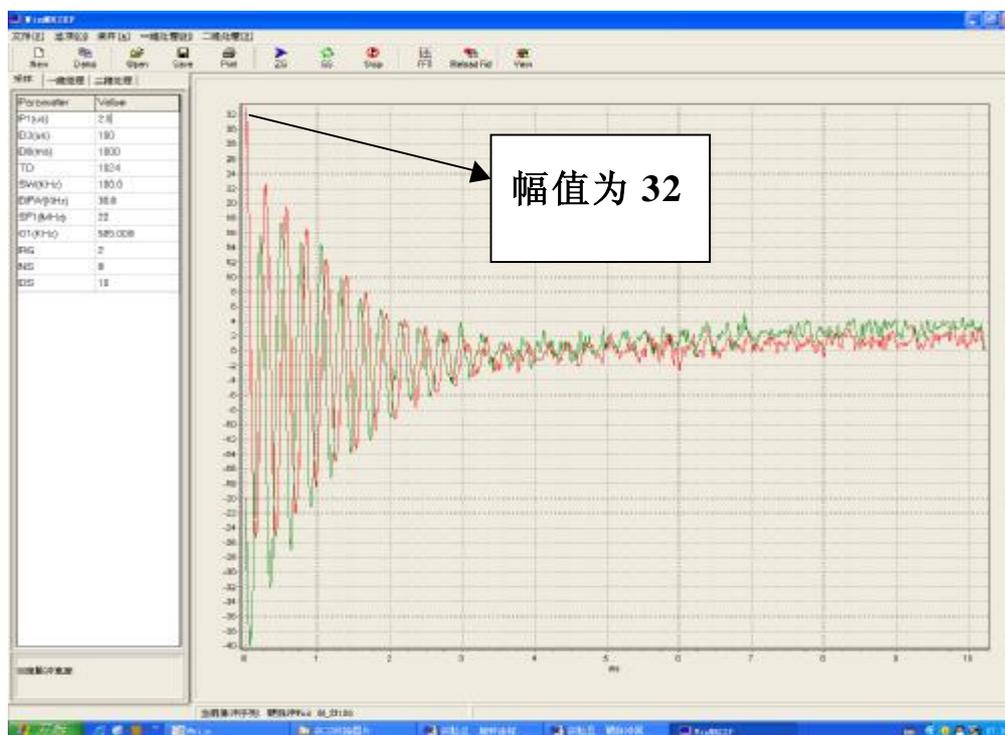


图9 P1为2时的FID信号

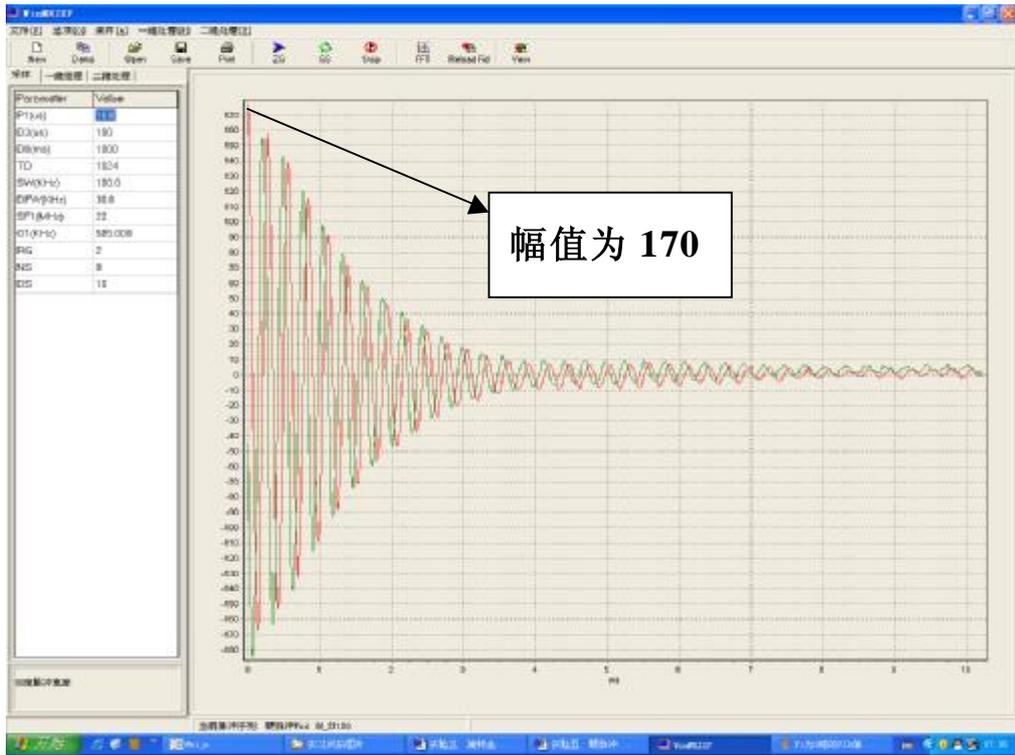


图10 P1为16时的FID信号

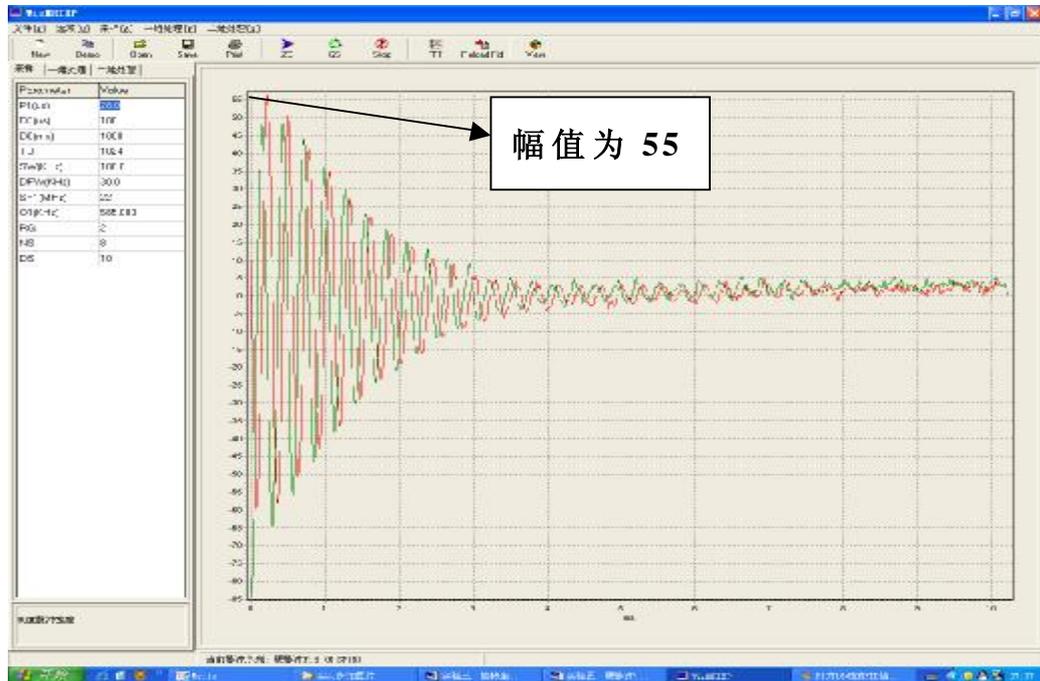


图11 P1为28时的FID信号

从以上三图可得出，P1 从小到大的变化过程中，FID 信号的幅值经历了从小到大再到小的过程，当 FID 信号幅值第一次达到最大时，此时的 P1 值对

应 90 度脉冲，之后 FID 信号幅值减小，当第一次达到最小值时，此时的 P1 值对就 180 度脉冲。

6、改变 SW 的值，即谱宽(见图 5)，分别设定 SW 为 12、25、50、100，观察 FID 信号的变化规律。把 SW 设为 50 时，效果如图 12 所示。

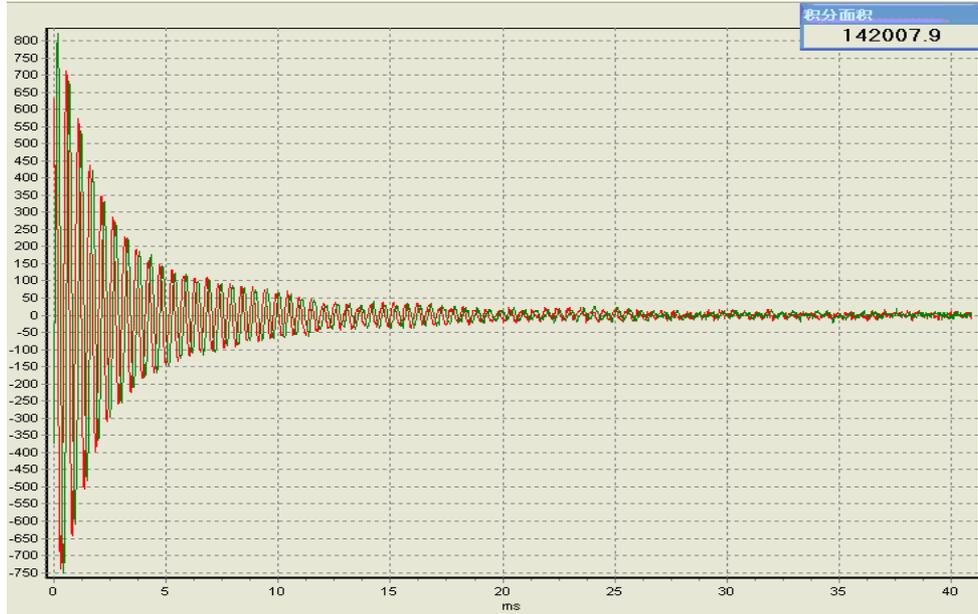


图 12

7、分别改变 D3 值(见图 5)，100、300、500、700、1000，观察 FID 信号的改变情况，并总结出规律。如图 13 所示为 D3=500 时的 FID 信号。

8、仔细观察 FID 信号的实部和虚部信号的特点。

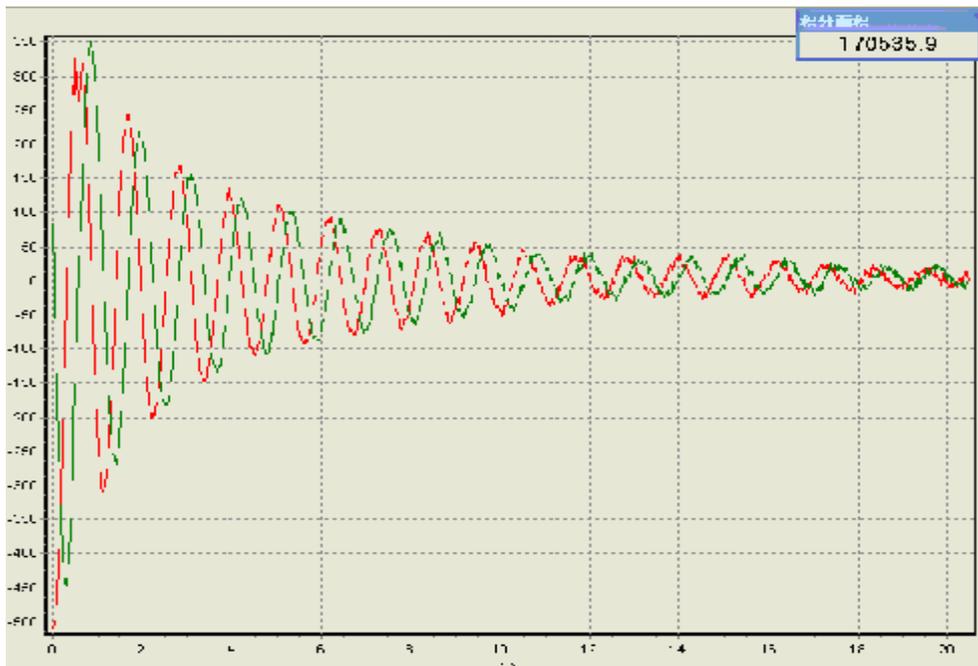


图 13

(二) 观察实验室坐标系下的 FID 信号

- 1、将示波器探针接到信号接收放大器的输出端；
- 2、调整示波器的时间轴和幅值刻度轴，观察并记录此时的 FID 信号；并与旋转坐标系中的 FID 信号进行比较，看有什么不同？

五、实验结果

- 1、FID 信号的大致特征是_____；
- 2、FID 实部信号和虚部信号的相位差为 _____；
- 3、在图 7 的基础上，计算 $T2^* =$ _____；

六、结果讨论与思考题

- 1、FID 信号的产生原理是什么？
- 2、FID 信号和射频信号频率之间的关系是什么？
- 3、观察图 4 所示的 FID 信号的频率是多少？其与线圈产生的 FID 信号之间的关系是什么？实际上前者是后者进行何种处理以后的信号形状？