

IEE3773 - Laboratorio de resonancia magnética

Simulación de imágenes de Resonancia Magnética

Objetivos

- Aplicar los contenidos los contenidos aprendidos durante el curso.
- Simular el proceso completo de una adquisición de imágenes en resonancia magnética.
- Entender el comportamiento de la magnetización ante la aplicación de pulsos de radiofrecuencia y gradientes de codificación de fase y frecuencia.

1. Contexto

Las imágenes de resonancia magnética se forman a partir de una combinación de pulsos de radiofrecuencia (RF) y gradientes de codificación de fase y frecuencia. Cada uno de estos objetos cambian la dinámica de los spins magnéticos, formando una señal en radiofrecuencia que puede ser medida a través de bobinas. La generación de esta señal se encuentra gobernada por la siguiente ecuación:

$$s(t) = \int_{\mathbf{r}'} M_{xy}(\mathbf{r}') \exp(-i2\pi \mathbf{r}' \cdot \mathbf{k}) d\mathbf{r}', \quad (1)$$

donde M_{xy} representa la magnetización del objeto a medir, γ la constante giromagnética, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ la posición del tejido y $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ las posiciones de las muestras medidas en el espacio k .

$$\mathbf{k} = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^T \mathbf{G}(\tau) d\tau, \quad \mathbf{G}(\tau) = (G_x(\tau), G_y(\tau), G_z(\tau)), \quad (2)$$

donde \mathbf{G} denota los gradientes de codificación de fase y frecuencia¹.

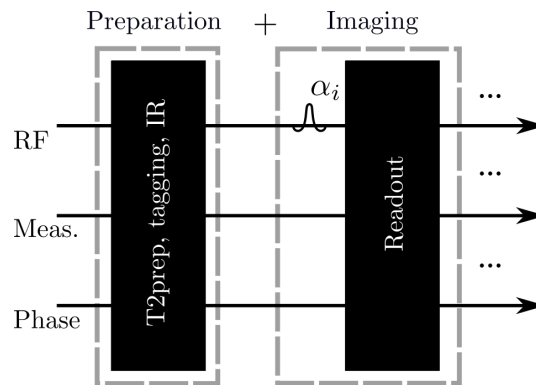


Figura 1: Representación de una secuencia de adquisición

Dependiendo de la combinación de estos objetos, se pueden recuperar distintas secuencias de adquisición y trayectorias del espacio k . El valor de M_{xy} depende de la combinación de pulsos de RF y gradientes aplicados durante la fase de preparación (vea Figura 1), mientras que \mathbf{k} de la combinación de gradientes aplicados durante la medición de la señal.

¹En nuestro caso, no nos interesa la componente z de la variable \mathbf{k} ni del gradiente \mathbf{G} .

2. Proyecto

La idea del proyecto es simular todas las partes del proceso de adquisición de imágenes de resonancia magnética (vea Figura 1). Para esto, en el repositorio del curso se encuentra un código que permite modelar el comportamiento de la magnetización en forma matricial², mediante la resolución de las ecuaciones de Bloch:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B} - \frac{M_x \hat{\mathbf{i}} + M_y \hat{\mathbf{j}}}{T2} - \frac{(M_z - M_0) \hat{\mathbf{k}}}{T1}, \quad (3)$$

donde M_0 es la magnetización en el equilibrio térmico, $T1$ y $T2$ son los tiempos de relajación, y \mathbf{B} los campos magnéticos externos, definidos como:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = B_0 \hat{\mathbf{k}} + \Delta B(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{k}} + (\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}) \hat{\mathbf{k}} + \mathbf{B}_1(t). \quad (4)$$

En la expresión anterior, B_0 representa el campo magnético principal, ΔB inhomogeneidades de campo locales, \mathbf{G} los gradientes aplicados y \mathbf{B}_1 los pulsos de RF.

La evolución de la magnetización dada en (4) se puede calcular iterativamente como:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}, t_{i+1}) = \mathbf{R}_z(\theta_g) \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{R}_{relax} \mathbf{R}_{RF} \mathbf{M}(\mathbf{r}, t_i), \quad (5)$$

donde θ_g y θ_i son ángulos asociados a los gradientes magnéticos y a las inhomogeneidades de campo, calculados de la siguiente manera:

$$\theta_g = \gamma \mathbf{r} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \mathbf{G}(\tau) d\tau, \quad \theta_i = \gamma \Delta B(\mathbf{r})(t_{i+1} - t_i), \quad (6)$$

y \mathbf{R}_z , \mathbf{R}_{relax} y \mathbf{R}_{RF} representan las siguientes matrices de rotación:

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7a)$$

$$\mathbf{R}_{relax} = \begin{bmatrix} e^{-\Delta t/T2(\mathbf{r})} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/T2(\mathbf{r})} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - e^{-\Delta t/T1(\mathbf{r})} \end{bmatrix}, \quad (7b)$$

$$\mathbf{R}_{RF} = \mathbf{R}_z(\phi) \mathbf{R}_x(\alpha) \mathbf{R}_z(-\phi), \quad (7c)$$

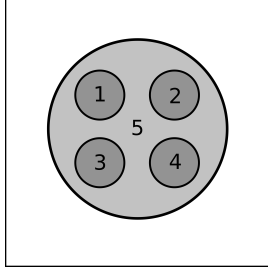
donde $\Delta T = t_{i+1} - t_i$, ϕ es la fase del pulso de RF, α el *flip angle* y

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Utilizando lo anterior como punto de partida:

- Modifique el código del repositorio del curso para crear un simulador de imágenes de resonancia magnética. Para esto debe añadir los gradientes de codificación de fase y frecuencia a la generación de la imagen.

²<http://mrsrl.stanford.edu/~brian/bloch/>



Cilindro	1	2	3	4	5
$T1$ [ms]	1000	1500	850	500	4000
$T2$ [ms]	200	300	50	20	1000
Δf [Hz]	5	10	15	20	0

Figura 2: Fantoma a utilizar con sus respectivos valores de $T1$, $T2$ y Δf .

- Añada al simulador una funcionalidad que le permita visualizar la trayectoria en el espacio k de las secuencias simuladas.

Utilizando el fantoma dado en la Figura 2, resuelva las siguientes preguntas:

1. Simule una adquisición *Inversion-Recovery* (IR) utilizando una trayectoria EPI, con un Tiempo de Inversión (TI) que permita anular la señal del cilindro 3 (ver Figura 3). Muestre la imagen reconstruida, su espacio k y la trayectoria seguida por el simulador.
2. Simule una adquisición IR utilizando una trayectoria espiral, con un TI que permita anular la señal del cilindro 3 (ver Figura 3). Muestre la imagen reconstruida, su espacio k y la trayectoria seguida por el simulador³.
3. Simule una adquisición IR utilizando una trayectoria radial, con un TI que permita anular la señal del cilindro 3 (ver Figura 3). Muestre la imagen reconstruida, su espacio k y la trayectoria seguida por el simulador³.
4. Repita las simulaciones pedidas en (3), (4) y (5), pero ahora añadiendo los efectos de *off-resonance*. Compare los nuevos resultados con aquellos obtenidos en (3), (4) y (5) y discuta las diferencias observadas en la imagen, el espacio k y la trayectoria.

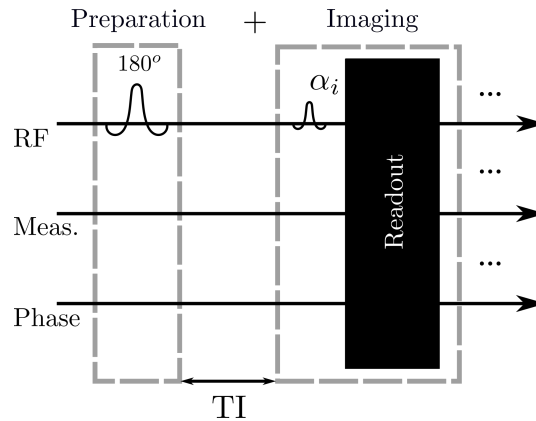


Figura 3: Secuencia de adquisición *Inversion-Recovery*.

³Para este caso, interpole el espacio k en una grilla cartesiana y realice la reconstrucción utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT).