



## วิธีการและ เทคนิคในการสร้างภาพจากสัญญาณเอ็มอาร์

การสร้างภาพจากสัญญาณเอ็มอาร์หรือ เรียกว่าเอ็มอาร์ไอ (MRI - Magnetic Resonance Imaging) นี้ มีวิธีการและ เทคนิคอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีก็ให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพ และ ข้อดีข้อ เสียแตกต่างกันไป สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะ ได้กล่าวถึง เทคนิค วิธีใช้การทำการแปลงแบบฟูเรียร์โดยตรง เท่านั้น ส่วนวิธีการอื่นๆ จะ ได้กล่าวถึงพอสังเขป เพื่อเป็นแนวทางในการเริ่มต้นต่อไป

วิธีการที่พอจะกล่าวถึง ได้ในปัจจุบันอาจแบ่งออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ [3] คือ

1. วิธีการสร้างภาพโดยการสร้างใหม่จากภาพฉาย (Projection Reconstruction Imaging)
2. วิธีการที่ไม่ใช่การสร้างภาพโดยการสร้างใหม่ (Non - reconstruction Imaging)

### วิธีการสร้างภาพโดยการสร้างใหม่จากภาพฉาย

วิธีการนี้มีเทคนิคต่างๆไปคล้ายคลึงกับวิธีการของ เอ็กเรย์ - คอมพิวเตอร์โทโมกราฟี ฟังก์ชัน ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีเทคนิคย่อยอยู่หลายวิธีการก็ตาม แต่ว่าหลักการพื้นฐานก็ยังคงมีลักษณะ เดียวกัน วิธีการพื้นฐานที่นิยมใช้ก็คือวิธีฟูเรียร์คอนโวลูชัน (Fourier convolution) ซึ่ง จะสร้างภาพจากภาพฉาย 1 มิติไปเป็นภาพในสองมิติและใน ภาพในสองมิติหลายๆภาพมาเรียงซ้อนกันจนได้ เป็นภาพในสามมิติ

การสร้างภาพในสองมิติจะ เริ่มที่ จะทำการเลือกกระบวน xy โดยเปลี่ยนสามแม่เหล็ก

ที่มีควมลาดในแนวแกน z เข้าไป พร้อมกับคลื่นสี่อาร์เอฟ 90° (90° RF pulse - Radio Frequency magnetic field) เข้าไป เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความลาด ดังนี้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กสถิต ในแต่ละระนาบ xy จึงมีค่าไม่เท่ากัน เป็นผลให้ค่าความถี่ลาร์เมอร์ของแต่ละระนาบไม่เท่ากันไปด้วย ดังนั้น จึงมีเพียงระนาบเดียวเท่านั้น ที่จะถูกกระตุ้น และสามารถปลดปล่อยสัญญาณเอโฟต์ออกมา

เมื่อหมดคลื่นสี่อาร์เอฟ ก็จะตัดสนามแม่เหล็กที่มีควมลาดในแนวแกน z ออก แล้วเปลี่ยนทิศทางที่มีควมลาดไปในทิศทางที่มุม  $\theta$  ไปตามระนาบ xy ในขณะที่จะมีสัญญาณเอโฟต์แพร่ออกมา จะเรียกว่าสัญญาณ  $S(t, \theta)$  และเมื่อทำการแปลงแบบฟูรีเยร์

$$P_1(x', \theta) = \mathcal{F}[S(t, \theta); t \rightarrow x'] \quad (3.1)$$

ก็จะได้  $P_1(x', \theta)$  ซึ่งเป็นภาพฉายของความหนาแน่นของสปีนในระนาบ xy ที่ถูกเลือก

และ จะ ได้รูปภาพของความหนาแน่นของสปีนในระนาบโดยการสร้างใหม่ (reconstruction) ใน 2 มิติ โดยใช้ [7]

$$f(x, y) = \int_0^\pi d\theta [P_1(x, \theta) \otimes \xi(x)] \quad (3.2)$$

เมื่อ

$\xi$  เป็นฟิลเตอร์เคอร์เนล (Filter Kernel)

และ  $\otimes$  เป็นสัญกรณ์แสดงการนำคอนโวลูชัน (convolution)

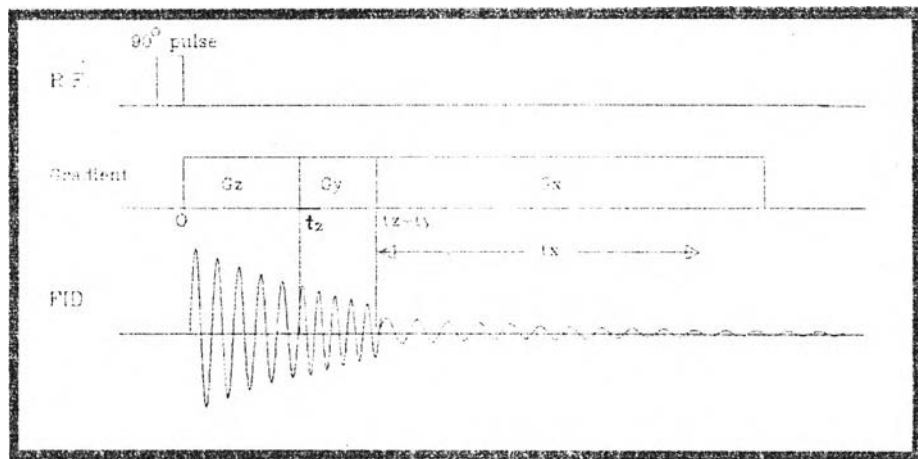
วิธีการที่ง่ายต่อการสร้างภาพโดยการสร้างใหม่

วิธีการที่ง่ายต่อการสร้างภาพโดยการสร้างใหม่นี้ ก็ยังคงอาจแบ่งออกเป็นวิธีการย่อยๆ ได้หลายวิธีเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามจะยกมากล่าวถึงเฉพาะวิธีที่ง่ายและได้คุณภาพเข้าใช้งานง่ายมีดังนี้ วิธีที่กล่าวถึงนี้คือ วิธีการสร้างภาพโดยการแปลงแบบฟูรีเยร์โดยตรง

(Direct Fourier Transform Imaging)

วิธีการนี้ถูกเสนอโดย คูมาร์ (Kumar) , เวลตี (Welti), และ เอิร์นส์ (Ernst) [3] ตั้งแต่นั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วิธีการแบบเคตต์บิลาวี (KWE method) ซึ่งวิธีการนี้จะกระตุ้นวัตถุทั้งชิ้นในสามมิติ แล้วผ่านสนามแม่เหล็ก H เข้าไป ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำสัญญาณเอาไว้อัดที่ได้ไปทำการแปลงแบบฟูเรียร์ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นความหนาแน่นของสปินในสามมิติ

ในภาพที่ 3.1 จะอธิบายถึงลำดับขั้นตอนการป้อนสัญญาณต่างๆเข้าไป โดยเริ่มตั้งแต่เปลี่ยนเฟส 90° เข้าไปก่อน จากนั้น สนามแม่เหล็กที่มีความลาด  $G_x, G_y$  และ  $G_z$  ก็จะถูกป้อนเข้าไปโดยมีทิศของความลาดไปในแนวแกน x, y และ z ที่ตั้งฉากกันตามลำดับ



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปในช่วงเวลาต่างๆ

องค์ประกอบในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง  $(x, y, z)$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$H(\vec{r}) = \begin{cases} H_0 & \text{เมื่อ } t < 0 \\ H_0 + z \cdot G_z & \text{เมื่อ } 0 < t < t_z \\ H_0 + y \cdot G_y & \text{เมื่อ } t_z < t < t_y + t_z \\ H_0 + x \cdot G_x & \text{เมื่อ } t_y + t_z < t \end{cases} \quad (3.3)$$

การตรวจวัดและบันทึกสัญญาณเอโฟลต์จะเริ่มต้นที่  $t_x = t - (t_y + t_z) = 0$  ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง โดยเพิ่มค่า  $t_y$  และ  $t_z$  คราวละเท่ากันไปเรื่อยๆ จนได้ค่าครบในช่วงที่กำหนด เช่น  $t_y$  แปรตั้งแต่ 0 ถึง  $t_a$  และ  $t_z$  ก็แปรจาก 0 ถึง  $t_b$

ในที่สุดเราจะ ได้สัญญาณเอโฟลต์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในสามมิติ คือ

$$s'(\vec{t}) \equiv s'(t_x, t_y, t_z)$$

ซึ่ง  $s'(\vec{t})$  นี้จะได้อมาจาก

$$s'(\vec{t}) = \int c(\vec{r}) \cdot s'(\vec{r}, \vec{t}) \cdot dv \quad (3.4)$$

$c(\vec{r})$  เป็นความหนาแน่นของสปีนที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$

$s'(\vec{r}, \vec{t})$  เป็นผลของแต่ละปริมาณเล็กๆ  $dv$  ที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$

สำหรับการวิเคราะห์ธรรมดาเห็น ฟังก์ชัน  $s'(\vec{r}, \vec{t})$  สามารถหาได้โดยการคำนวณจากสมการของบลอช (Bloch equations) จะได้ [5]

$$s'(\vec{r}, \vec{t}) = M_0 \cdot \cos[(\Delta + \eta_x x)t_x + (\Delta + \eta_y y)t_y + (\Delta + \eta_z z)t_z] \cdot e^{-(t_x + t_y + t_z)/T_2} \quad (3.5)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta = -\mathbf{r} \cdot \mathbf{H}_0 \quad \text{และ} \quad \eta_k = -\mathbf{r} \cdot \mathbf{G}_k \quad (3.6)$$

เมื่อ เรนแปลงแบบฟูเรียร์ในสามมิติของ  $s'(\vec{t})$  ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็น

$$S(\vec{\omega}) \equiv S(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

จะหาได้จาก

$$S(\vec{\omega}) = \iiint s'(t) \cdot e^{-i \cdot \vec{\omega} \cdot \vec{r}} \cdot dt_x \cdot dt_y \cdot dt_z \quad (3.7)$$

ซึ่งจะได้คำตอบเป็น

$$S(\vec{\omega}) = \int c(\vec{r}) \cdot S(\vec{r}, \vec{\omega}) \cdot dv \quad (3.8)$$

โดย

$S(\vec{r}, \vec{\omega})$  เป็นผลการแปลงแบบฟูเรียร์ของ  $s'(\vec{r}, t)$  และสามารถคำนวณได้ว่ามีค่าเป็น

$$\begin{aligned} S(\vec{r}, \vec{\omega}) = & (1/2) \cdot G(\Delta + \eta_x x - \omega_x) \cdot G(\Delta + \eta_y y - \omega_y) \cdot G(\Delta + \eta_z z - \omega_z) \\ & + (1/2) \cdot G(-\Delta - \eta_x x - \omega_x) \cdot G(-\Delta - \eta_y y - \omega_y) \cdot G(-\Delta - \eta_z z - \omega_z) \end{aligned} \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$G(\omega) = (M_0/T_2) / ((1/T_2)^2 + \omega^2) + i \cdot (M_0 \omega) / ((1/T_2)^2 + \omega^2) \quad (3.10)$$

ฟังก์ชัน  $G(\omega)$  นี้จะถูกเรียกว่า ฟังก์ชันของการกระจายของเส้น (line spread function) หรือ ฟังก์ชันรูปร่าง (line shape function) ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการแยกรายละเอียดของภาพ (Resolution) อย่างมากเนื่องจากว่า  $S(\vec{\omega})$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่แทนความหนาแน่นของสปีนในตำแหน่ง  $\vec{\omega}$  จะเป็นผลของคอนโวลูชัน (convolution) ของ  $c(\vec{r})$  ซึ่งเป็นความหนาแน่นจริงของสปีนกับฟังก์ชันการกระจายของเส้น  $G(\omega)$  ซึ่งฟังก์ชัน  $G(\omega)$  นี้จะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งถ้าหากว่ามีฐานแบนยอดสูงแล้วจะทําให้  $S(\vec{\omega})$  รูปร่างใกล้เคียงกับ  $c(\vec{r})$  มากขึ้น แต่ถ้ามีฐานกว้างจะทําให้  $S(\vec{\omega})$  ที่ได้ไม่คมชัด อาจกล่าวได้ว่า  $G(\omega)$  ที่ดีที่สุดในรูปฟังก์ชันเดลต้าของดิแรค (Dirac delta function) ซึ่งจะทําให้  $S(\vec{\omega})$  มีรูปร่างเหมือนกันกับ  $c(\vec{r})$  ทุกประการ

ตามปกติแล้วเราจะประมาณว่า  $G(\omega)$  มีความกว้างน้อยมาก [5] และจากเงื่อนไขนี้จะทําให้ฟังก์ชันของสมการ (3.8) สามารถประมาณได้ว่าไม่มีผลในการอินทิเกรต ทําให้

$$S'(\vec{r}, \vec{\omega}) = (1/2) \cdot G(\Delta + \eta_x x - \omega_x) \cdot G(\Delta + \eta_y y - \omega_y) \cdot G(\Delta + \eta_z z - \omega_z) \quad (3.11)$$

พิจารณาเห็นได้ว่า  $S'(\vec{r}, \vec{\omega})$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$S'(\vec{r}, \vec{\omega}) = S(\vec{0}, \vec{\omega} - \eta \cdot \vec{r}) \quad (3.12)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_x & 0 & 0 \\ 0 & \eta_y & 0 \\ 0 & 0 & \eta_z \end{bmatrix}$$

แทนค่า  $\vec{\omega}$  โดย ตัวแปรเชิงเส้น  $\vec{r}$  ได้

$$\vec{\omega} = \Delta \cdot \vec{1} + \eta \cdot \vec{r} \quad (3.13)$$

$$\vec{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

แทนค่า (3.11), (3.12) ลงใน (3.7) จะได้

$$\bar{c}(\vec{r}) = S'(\vec{\omega}) = S'(\Delta \cdot \vec{1} + \eta \cdot \vec{r}) = \int c(\vec{r}') \cdot S(\vec{0}, \Delta \cdot \vec{1} + \eta(\vec{r}' - \vec{r})) \cdot dv \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.13) นี้ จะเห็นได้ชัดเจนว่า  $\bar{c}(\vec{r})$  ที่ได้จะเป็นผลของคอนโวลูชันหรือการกรอง (filtered) พียงชั้นความหนาแน่นของสปีดที่แท้จริงของสปีดกับฟังก์ชันรูปร่าง (line shape function)  $S(\vec{0}, \Delta \cdot \vec{1} + \eta \cdot \vec{r})$  ซึ่งอาจเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นโดยประมาณที่ฟังก์ชันรูปร่างแคบมาก ได้เป็น

$$\bar{c}(\vec{r}) = (1/2) \cdot \int c(\vec{r}') \cdot G(\eta_x(x-x')) \cdot G(\eta_y(y-y')) \cdot G(\eta_z(z-z')) \cdot dv \quad (3.15)$$

บทนิยามนี้จะพบว่า  $\bar{c}(\vec{r})$  ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน (complex function) ซึ่งทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพต่างก็เป็นผลจากการดูดกลืน (absorbtion) และการแพร่ (dispersion) ของโมเมนตัมเหล็กที่อยู่ในระบบ และเราจะพบว่า ค่าที่ควรจะนำมาใช้งานในการสร้างภาพจะไม่ใช่เพียงส่วนจริงหรือส่วนจินตภาพเท่านั้น หากแต่ควรจะใช้ค่าสัมบูรณ์ (absolute value) [5] ของฟังก์ชันมาใช้ในการสร้างภาพ ซึ่งถ้าหากว่าใช้ค่าความลาดของสนามแม่เหล็กมากขึ้นเท่าใดก็จะทำให้ภาพที่ได้หรือ  $|\bar{c}(\vec{r})|$  นี้มีค่าใกล้เคียงกับ  $c(\vec{r})$  มากขึ้นเท่านั้น

นอกจากนี้ในการปฏิบัติการจริงนั้น มักจะมีการนำอุปกรณ์ตรวจจับที่ไวต่อเฟส (phase detector หรือ phase sensitive detector) มาร่วมใช้งานด้วย อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณเข้ามาสองสัญญาณด้วยกัน สิ่งหนึ่งจะเป็นสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่คงที่  $\omega_1$  ส่วนอีกสิ่งหนึ่งเป็นสัญญาณที่ตรวจวัดได้ สัญญาณนี้จะถูกเลื่อนไป (shift) ในปริภูมิฟูเรียร์ (Fourier space) เท่ากับความถี่  $\omega_1$  ทำให้สัญญาณนี้ออกมีความถี่คงโดยที่ถ้าทำการแปลงแบบฟูเรียร์ไป รูปร่างของฟังก์ชันที่ได้จากการแปลงแบบฟูเรียร์จะมีรูปร่างเหมือนกัน

ในการใช้อุปกรณ์ตรวจจับที่ไวต่อเฟสเข้ามาช่วยนี้ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงในสมการ (3.4) เล็กน้อย คือ สำหรับสมการ (3.5) จะได้ว่า

$$\Delta = -\tau H_0 - \omega_1 \quad (3.16)$$

ประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์ตรวจจับเฟสก็คือ สัญญาณที่ได้จะมีความถี่ลดลง ทำให้ง่ายต่อการวัดโดยสะดวก ปรแปลงจากสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแอนะล็อกเฟเตอร์ นอกจากนี้แล้วการใช้ อุปกรณ์ตรวจจับที่ไวต่อเฟส ยังทำให้เราสามารถเลือกเฟสที่จะทำการตรวจวัดได้ด้วย ซึ่งถ้าเราเลือกตรวจวัดสัญญาณที่เฟสต่างกัน  $90^\circ$  จะทำให้เราได้สัญญาณขาออก 2 สัญญาณ ซึ่งสัญญาณหนึ่งจะออกมาเป็นผลประกอบของฟังก์ชันโคไซน์ (cosine) ดังสมการ (3.4) และ (3.5) ส่วนอีกสัญญาณหนึ่งจะมีเฟสต่างไป  $90^\circ$  เป็นผลประกอบของฟังก์ชันไซน์ (sine)

คือ

$$s''(\vec{t}) = \int c(\vec{r}) \cdot s(\vec{r}, \vec{t}) \cdot dv$$

โดย

$$s(\vec{r}, \vec{t}) = M \sin[(\Delta + \eta_x x)t_x + (\Delta + \eta_y y)t_y + (\Delta + \eta_z z)t_z] e^{-(t_x + t_y + t_z)/T_2}$$

ซึ่งถ้าเราพิจารณาจากทั้งสองเฟสรวมกันได้อย่างเชิงเส้นโดยให้

$$s(\vec{t}) = s'(\vec{t}) + i \cdot s''(\vec{t})$$

ซึ่งเมื่อเอา  $s(\vec{t})$  นี้ไปทำการแปลงแบบฟูเรียร์จะได้ผลลัพธ์ออกมาทางเองเดียวกันกับ  $s'(\vec{t})$  แต่จะพบว่าเทอมที่สองเช่นในสมการ (3.9) จะหายไป นั่นคือ

$$S(\vec{\omega}) = \iiint s(\vec{t}) e^{-i \cdot \vec{\omega} \cdot \vec{t}} dt_x dt_y dt_z$$

ซึ่งจะได้

$$\bar{c}(\vec{r}) = S(\vec{\omega}) = \int c(\vec{r}) \cdot S(\vec{r}, \vec{\omega}) \cdot dv$$

โดย

$$S(\vec{r}, \vec{\omega}) = G(\Delta + \eta_x x - \omega_x) \cdot G(\Delta + \eta_y y - \omega_y) \cdot G(\Delta + \eta_z z - \omega_z)$$

นั่นคือ ถ้าเรามีสัญญาณ  $s(\vec{t})$  ที่เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนที่ได้มาจากอุปกรณ์ตรวจวัดเฟสแล้ว เมื่อเอาสัญญาณ  $s(\vec{t})$  นี้มาทำการแปลงแบบฟูเรียร์จะทำได้ได้  $\bar{c}(\vec{r})$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแน่นอนของสปีทที่ผ่านการกรองออกมา โดยที่  $\bar{c}(\vec{r})$  จะใกล้เคียงกับฟังก์ชันดั้งเดิม  $c(\vec{r})$  เพียงไรก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชันรูปร่าง  $G(\omega)$  ว่าจะมีลักษณะอย่างไร