บทที่ 5

# อุปกรณ์การทดลอง

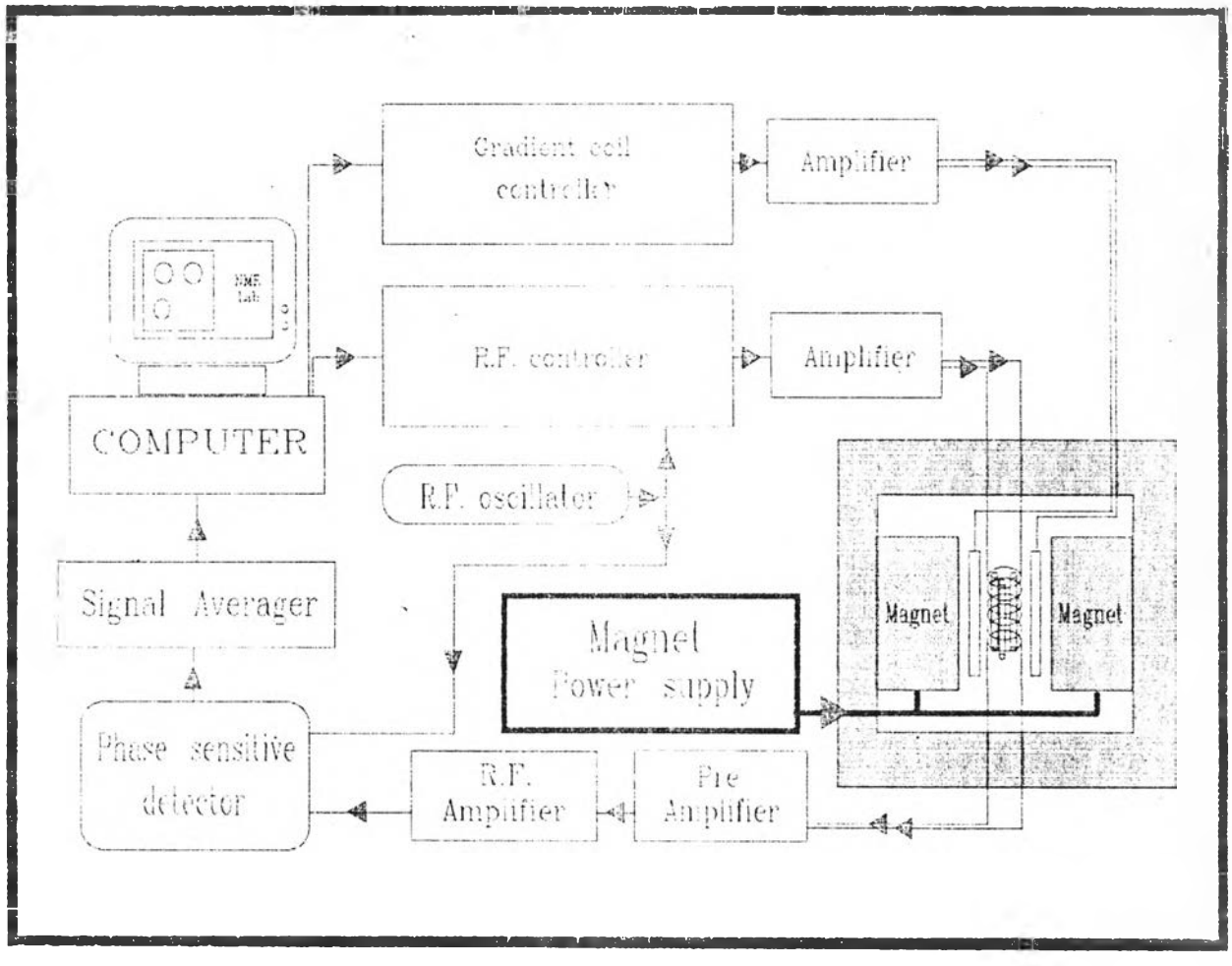
การปฏิบัติการทดลอง เรื่องการสร้างภาพด้วยวิธีเอ็นเอ็มอาร์นี้ จำเป็นต้องใช้วิชาความรู้และความสามารถของบุคคลในหลายแขนงวิชามาประกอบกัน เพื่อให้การทดลองลุล่วงไปได้ ดังนั้นงานและอุปกรณ์จะถูกแบ่งให้แต่ละบุคคลซึ่งมีความสามารถต่างกันศึกษาและจัดการในด้านที่ตนมีความชำนาญอยู่ และเมื่อนำมาใช้งานร่วมกันแล้วจึงจะสามารถทำงานได้ตามเป้าประสงค์ ดังเช่น วิทยานิพนธ์นี้เองก็เป็นเรื่องของการนำเทคนิคทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่ได้มาจากการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีความรู้ความเข้าใจในการทำงานของส่วนอื่นๆในระบบก็นับว่าเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อที่จะเข้าใจถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ได้โดยกระจ่างชัด ดังนั้น ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงการทำงานของการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบพอเป็นที่เข้าใจ

## ส่วนประกอบของระบบ

การทำงานของระบบอาจแสดงให้เห็นได้โดยแผนภาพดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญดังนี้ คือ

- แม่เหล็ก (magnet) และเครื่องจ่ายพลังงาน (power supply)
- คอมพิวเตอร์
- ขดลวดสำหรับสัญญาณความถี่วิทยุ (RF coil)
- เครื่องสร้างสัญญาณความถี่วิทยุ (RF oscillator)
- เครื่องควบคุมสัญญาณความถี่วิทยุ (RF controller)
- เครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุ (RF amplifier)
- ขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความลาด (gradient coil)

- เครื่องสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับสนามแม่เหล็กที่มีความลาด (gradient controller)
- เครื่องขยายสัญญาณควบคุมสำหรับสนามแม่เหล็กที่มีความลาด (gradient amplifier)
- เครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟส (phase sensitive detector)
- เครื่องเฉลี่ยสัญญาณ (signal averager)




ภาพที่ 5.1 แสดงถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการทดลองและ
ลักษณะการส่งสัญญาณควบคุมเครื่องมูล

ซึ่งแต่ละส่วนจะทำงานประสานกันเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ ดังจะได้อธิบายถึงการทำงานของแต่ละส่วนต่อไป และเมื่อเข้าใจถึงการทำงานของส่วนย่อยแล้วก็จะสามารถเข้าใจถึงการทำงานรวมของทั้งระบบดังจะกล่าวถึงในบทต่อไป

แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองจะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet) ซึ่งนับเป็นหัวใจสำคัญของการทดลองนี้เลยทีเดียว เพราะการทดลองทางเอ็นเอ็มอาร์นี้จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง และโดยปรกติแล้วการใช้แม่เหล็กถาวรจะไม่เหมาะนัก โดยเฉพาะในการทดลองที่ต้องการแปรค่าความถี่ของเรโซแนนซ์ ซึ่งแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถทำได้สะดวกกว่าแม่เหล็กถาวรมาก

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้จะต้องมีมากน้อยเพียงใดนั้น ย่อมขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ของการเรโซแนนซ์ และชนิดของนิวเคลียสที่ต้องการใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการ $w = \gamma H$ สำหรับในการทดลองนี้จะทำกับโปรตอนโดยความถี่ที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 10 MHz ดังนั้น จึงต้องใช้แม่เหล็กที่มีความเข้มเท่ากับ 10 / 42.58 เทสลา = 0.23 เทสลา

เรื่องที่นับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญมากสำหรับแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองเรื่องการสร้างภาพจากสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์นี้ ได้แก่ ความเป็นเอกพันธ์ (homogeneity) ของสนามที่สร้างขึ้น เนื่องจากว่าถ้าหากสนามที่เกิดขึ้นไม่เป็นเอกพันธ์แล้วจะเห็นได้ว่า ทฤษฎีดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3 จะไม่สามารถใช้ได้หรือมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และอาจเป็นผลให้การทดลองล้มเหลวไปเลยก็เป็นได้

คอมพิวเตอร์

หากจะเปรียบแม่เหล็กได้ว่าเป็นหัวใจของระบบแล้ว คอมพิวเตอร์ก็ต้องนับว่าเป็นสมองของระบบเลยทีเดียว เนื่องจากว่าในระบบนี้ คอมพิวเตอร์จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุม

การทำงานของส่วนอื่นในระบบเกือบทั้งหมด และนอกจากนี้ คอมพิวเตอร์ยังทำหน้าที่รับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการประมวลผลเพื่อแสดงออกเป็นภาพอีกด้วย

เพื่อความมีประสิทธิภาพในการทดลอง จำเป็นที่คอมพิวเตอร์ที่ใช้จะต้องเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพดี ทำงานเร็ว มีหน่วยความจำหลักและหน่วยความจำสำรองสูง และเพื่อความสะดวกในการอ่านผลการทดลอง จอภาพที่ใช้ควรมีความสามารถในการแสดงภาพเป็นสีได้ด้วย ซึ่งในระบบนี้ได้เลือกใช้คอมพิวเตอร์ยี่ห้อ ต้าทุง (TATUNG) รุ่น ทีซีเอส - 7000 ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์ที่เข้ากันได้กับเครื่องไอบีเอ็ม (IBM compatible) มีหน่วยความจำหลัก 640 กิโลไบท์ มีหน่วยความจำสำรองเป็นดิสก์แข็ง (hard disk) ขนาด 30 เมกะไบท์ ใช้ระบบแสดงภาพแบบ อีจีเอ (EGA - Enhance Graphics Adaptor) ซึ่งสามารถแสดงภาพได้ละเอียดถึง 640 x 350 จุดภาพ (pixel) ด้วยสีทั้งหมด 16 สี

การควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์นี้ จะทำการควบคุมผ่านพอร์ท ในระบบมาตรฐาน IEEE-488 หรือ จีพีไอบี (GPIB - General Parallel Interface Board) ซึ่งเป็นพอร์ทแบบขนานที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งในอุปกรณ์ยุคใหม่ที่มีความจำเป็นต้องติดต่อหรือควบคุมโดยคอมพิวเตอร์มักจะมีระบบ IEEE-488 นี้ติดตั้งเป็นมาตรฐานในการส่งสัญญาณติดต่อและควบคุม

<u>ชุดอุปกรณ์สร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุ</u>

เครื่องสร้างสัญญาณความถี่วิทยุเป็นเครื่องมือที่ทางห้องทดลองสร้างขึ้นเองเพื่อให้ผลิตสัญญาณความถี่ 10.2496 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ สัญญาณนี้จะถูกนำไปใช้ในการกระตุ้นโมเมนต์แม่เหล็กในสารตัวอย่างให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น

อย่างไรก็ตามการที่จะสร้างภาพขึ้นมานั้น จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กสลับที่ความถี่วิทยุในช่วงเวลาอันสั้นๆที่เหมาะสม ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องสร้างสัญญาณจึงไม่สามารถนำไปป้อนให้แก่ขดลวดความถี่วิทยุได้โดยตรง แต่จะต้องผ่านอุปกรณ์ควบคุมสนามความถี่วิทยุ และเครื่องขยายสัญญาณความถี่สูงเสียก่อน ซึ่งเครื่องควบคุมสนามความถี่วิทยุนี้จะถูกควบคุม

ด้วยคอมพิวเตอร์เช่นกัน เพื่อให้ระบบทำงานสัมพันธ์กันทั้งหมด

ชุดอุปกรณ์สร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กที่มีความลาด

ในการทดลองเรื่องการสร้างภาพด้วยวิธีเอ็นเอ็มอาร์ไอ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความลาด ซึ่งมีการแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ตามแต่ว่าจะทำการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีใด ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงและความเข้มของความลาดไปได้ในทุกรูปแบบ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ขดลวดทั้งหมดสามชุดทำหน้าที่กำเนิดสนามแม่เหล็กที่มีความลาดในสามทิศทางที่ตั้งฉากกัน ทำให้สามารถควบคุมสนามได้ในทุกรูปแบบตามความต้องการ

สำหรับการควบคุมขดลวดทั้งสามชุดนี้จะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณควบคุม (ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เช่นกัน) ส่งสัญญาณควบคุมผ่านเครื่องขยายสัญญาณเพื่อเพิ่มกระแสให้พอเพียงที่จะสร้างสนามแม่เหล็กได้ แล้วจึงส่งต่อสัญญาณให้ขดลวดอีกทีหนึ่งเพื่อควบคุมสนามแม่เหล็กให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้โดยคอมพิวเตอร์

เครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟส

เครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟส เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เลื่อนความถี่ของสัญญาณจากความถี่สูงมากในระดับความถี่วิทยุลงมาเป็นระดับความถี่ต่ำพอที่จะตรวจวัดได้โดยง่าย การทำงานของเครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟส จะต้องมีสัญญาณเข้ามาสองสัญญาณ สัญญาณหนึ่งจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ (sinusodual) ที่มีความถี่คงที่ เรียกว่าเป็นสัญญาณอ้างอิง (referance) ส่วนอีกสัญญาณหนึ่งเป็นสัญญาณที่ต้องการตรวจจับที่ไวต่อเฟส เรียกว่าเป็นสัญญาณขาเข้า (Input) [6]

ภายในเครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟสจะมีวงจรซึ่งทำหน้าที่คูณสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน และนำผลที่ได้ไปผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) [6] ซึ่งผลที่ออกมาจากวงจรกรองนี้จะเป็นสัญญาณที่เสมือนว่าเป็นสัญญาณขาเข้าที่ถูกเลื่อนไปในปริภูมิ

ฟูเรียร์เป็นระยะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอ้างอิง เช่น ถ้าสัญญาณขาเข้าเป็น

$$f(t) = \sin(\omega_1 t)$$

และสัญญาณอ้างอิงเป็น

$$h(t) = \sin(\omega_0 t)$$

คูณกันจะได้

$$f(t).h(t) = \sin(\omega_0 t)\cdot\sin(\omega_1 t)$$

$$= \cos((\omega_1-\omega_0)\cdot t) - \cos((\omega_1+\omega_0)\cdot t)$$

จะเห็นได้ว่า $\omega_1 + \omega_0$ มีค่ามากกว่า $\omega_1 - \omega_0$ มาก

และเมื่อกรองส่วนที่มีความถี่สูงออก ก็จะเหลือเฉพาะ

$$C(t) = \sin((\omega_1 - \omega_0)\cdot t)$$

ซึ่งเป็นสัญญาณขาเข้าที่ถูกเลื่อนความถี่ไป $\omega_0$

สำหรับเครื่องตรวจจับที่ไวต่อเฟสที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีช่อง (channel) สำหรับตรวจจับสัญญาณขาเข้าอยู่ 2 ช่องด้วยกัน โดยช่องหนึ่งจะตรวจจับองค์ประกอบของสัญญาณที่มีเฟสตรงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิง ส่วนอีกช่องหนึ่งจะตรวจจับองค์ประกอบของสัญญาณที่มีเฟสที่ต่างจากเฟสของสัญญาณอ้างอิงไป 90° หรืออาจกล่าวเปรียบเทียบได้ว่า ถ้าช่องหนึ่งจะมีสัญญาณขาออกเป็นไซน์แล้วอีกช่องหนึ่งก็จะมีสัญญาณขาออกเป็นโคไซน์

เครื่องเฉลี่ยสัญญาณ

ในการตรวจวัดสัญญาณใดๆก็ตาม โดยปกติแล้วจะหลีกเลี่ยงการมีสัญญาณรบกวน (noise) ได้ยาก และถ้าหากว่าอัตราส่วนของสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวนหรือเอสเอ็นอาร์ (SNR - Signal to Noise Ratio) มีค่าสูงปัญหาก็มักไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าหากว่าเอสเอ็นอาร์มีค่าต่ำแล้ว จะทำให้ไม่สามารถแยกแยะสัญญาณจริงออกจากสัญญาณรบกวนได้ เช่นในการทดลองเรื่องการสร้างภาพโดยวิธีเอ็นเอ็มอาร์นี้ ตามปรกติแล้วสัญญาณที่แพร่ออกมาโดยวัตถุต้องอย่างจะมีระดับความสูงของสัญญาณน้อยมาก ทำให้มีอัตราส่วนของสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวนต่ำมาก

ด้วยเหตุนี้จะได้มีการใช้เทคนิคทำการทดลองซ้ำหลายครั้งด้วยเงื่อนไขเดียวกันแล้วนำเอาสัญญาณที่ได้ในแต่ละครั้งมาเฉลี่ยกัน ซึ่งถ้าหากสัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณรบกวนชนิดสุ่ม (random noise) แล้วอัตราส่วนของสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวนของผลรวมสัญญาณจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆตามจำนวนสัญญาณที่นำมาเฉลี่ย โดยจะแปรผันกับรากที่สองของจำนวนข้อมูล [11]

เครื่องเฉลี่ยสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องซึ่งผลิตโดย บริษัทพริ้นซ์ตันแอพพลายรีเสิร์ช (Princeton Applied Research Coporation) มีช่องสัญญาณอยู่สองช่องที่สามารถรับข้อมูลที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปแปลงเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (digital) ได้อย่างอิสระต่อกัน แล้วจึงนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกับข้อมูลเดิมที่อยู่ภายในหน่วยความจำภายในเครื่อง และแสดงผลการเฉลี่ยออกทางจอภาพของเครื่อง ซึ่งนอกจากจอภาพแล้ว เครื่องนี้ยังมีความสามารถที่จะส่งข้อมูลให้แก่เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมันสามารถส่งข้อมูลของสัญญาณเชิงตัวเลขให้คอมพิวเตอร์ได้ช่องละ 1024 ข้อมูล โดยมีความละเอียดข้อมูลละ 28 บิท