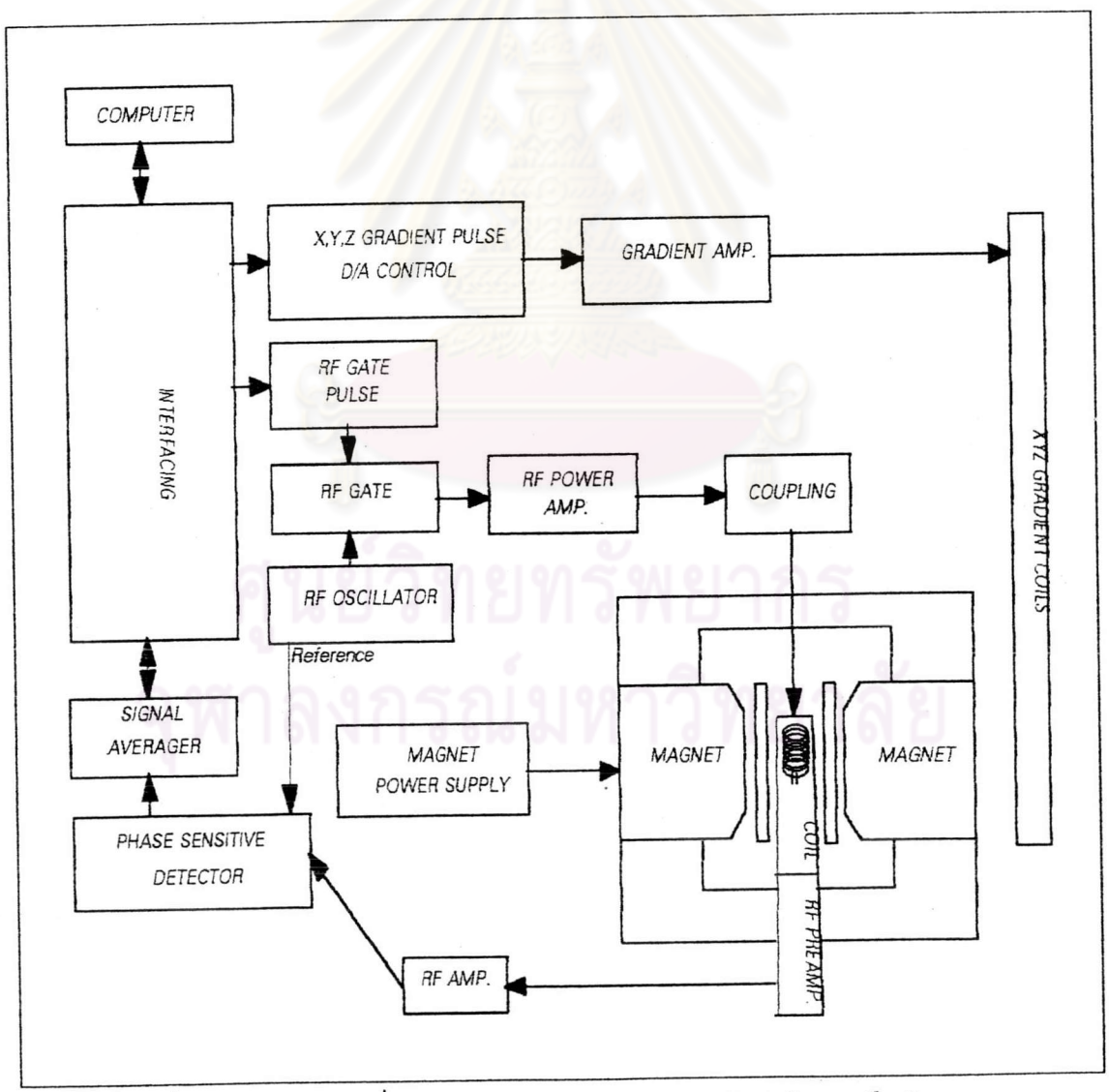
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# เครื่องมือการสร้างภาพโดยวิธีเอ็นเอ็มอาร์

## 3.1 ส่วนประกอบของระบบ

การทำงานของระบบสร้างภาพโดยวิธีเอ็นเอ็มอาร์ที่ห้องปฏิบัติการเอ็นเอ็มอาร์ แสดงในแผนภาพดังรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและลักษณะการรับส่งข้อมูลหรือสัญญาณ

019558

จากรูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญ สามารถแยกออกได้เป็นดังนี้คือ

แม่เหล็ก (Magnet)

แม่เหล็กที่ใช้เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทดลองเอ็นเอ็มอาร์จำเป็นที่ต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง โดยปกติจะไม่นิยมใช้แม่เหล็กถาวรเนื่องจากการทดลองเอ็นเอ็มอาร์ต้องการปรับเปลี่ยนความถี่กำธร การใช้แม่เหล็กไฟฟ้าจะเหมาะสมกว่า

ความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับความถี่กำธรที่ต้องการ ดังสมการที่ 2.3 ความถี่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่เน้นการกำธรของโปรตอนที่ 10 MHz ความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 0.23 เทสลา

ความเป็นเอกพันธ์(homogenity)ของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้มีความสำคัญมาก ความถูกต้องของทฤษฎีดังแสดงไว้ในบทที่ 2 ขึ้นอยู่กับความเป็นเอกพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ด้วย

เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

เครื่องคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานการส่งผ่านข้อมูลต่าง อาทิ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีความลาด(gradient pulse) การรับส่งข้อมูลกับเครื่องเฉลี่ยสัญญาณ(signal averager) รวมทั้งการประมวลผลสัญญาณ การสร้างภาพจากสัญญาณ

เพื่อประสิทธิภาพในการทดลอง เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ต้องมีความเร็วในการคำนวณพอสมควร ทำงานเร็ว และมีหน่วยความจำพอเหมาะ ในห้องปฏิบัติการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ของต้าถุง (TATUNG)รุ่น TCG-7000 เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เข้ากันได้กับเครื่องไอบีเอ็ม(IBM compatible) CPU 80286-12 และ 80287-8 หน่วยความจำ ปกติ 512 KB หน่วยจำยืดขยาย(Extented memory) 512 KB Hard disk 30 Mbyte แสดงผลแบบ EGA 16 สี

การควบคุมเครื่องมือผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำการควบคุมผ่านพอร์ทมาตราฐานของ IEEE-488 หรือ GPIB(General Paraller Interface Board)

<u>เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุ</u>(RF Oscillator)

เป็นเครื่องที่สร้างสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุในรูปคลื่นความถี่ที่ความถี่ 10.000 MHz สัญญาณนี้จะไปกระตุ้นโมเมนต์แม่เหล็กในสารตัวอย่างเพื่อทำให้เกิดการกำธรขึ้น

<u>เครื่องสร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กที่มีความลาด</u> (Gradient Pulse Control)

ในการทดลองการสร้างภาพโดยวิธีเอ็นเอ็มอาร์ มีความจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความลาดใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกันคือ แนวแกน x,y,z เครื่องสร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กที่มีความลาดทำหน้าที่กำเนิดสนามแม่เหล็กที่มีความลาดใน 3 ทิศทางเพื่อควบคุมสนามได้ในรูปแบบตามที่ต้องการ

เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความลาดถูกควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกัน

<u>เครื่องตรวจจับเฟส</u> (Phase sentity detector)

ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญานเอ็นเอ็มอาร์ปรับเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งปกติใช้สัญญาณ 10 MHz ที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง โดยทำหน้าที่คูณสัญญาณทั้งสองแล้วปล่อยความถี่ต่ำผ่านไป(low-pass filter) ผลของสัญญาณ(product)ที่ได้จะเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับ $\omega_0$ สัญญาณที่ได้นำไปผ่านเครื่องเฉลี่ยสัญญาณ (signal averager)ต่อไป

สมมุติสัญญาณอ้างอิงเป็น $h(t) = \sin(\omega_1 t)$

สัญญาณขาเข้าเป็น $F(t) = \sin(\omega_0 t)$

ผลคูณ dot product ของทั้งสองสัญญาณเป็น

$$F(t) \cdot g(t) = \sin(\omega_0 t) \cdot \sin(\omega_1 t)$$

$$= \cos[(\omega_1-\omega_0)t] - \cos[(\omega_1-\omega_0)t]$$

เนื่องจาก $(\omega_1-\omega_0)$ เป็นความถี่เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter) จะตัดคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าที่กำหนดไว้ออก ดังนั้นสัญญาณที่ขาออกของเครื่องตรวจจับเฟสเป็น

$$C(t) = \sin[(\omega_1-\omega_0)t] \quad \text{.....(3.1)}$$

<u>เครื่องเฉลี่ยสัญญาณ</u>(Signal Averager)

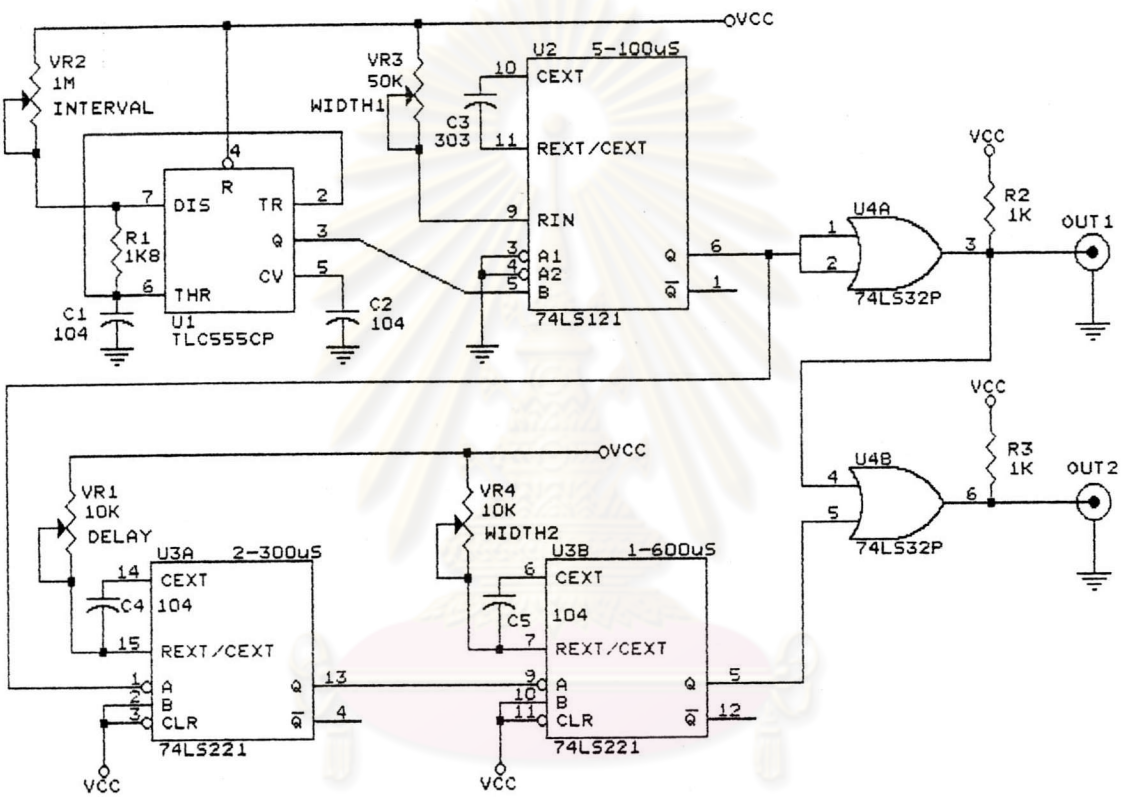
ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล(analog to digital convertor) พร้อมทำการเฉลี่ยสัญญาณเพื่อทำให้ S/N (signal to noise ratio)ดีขึ้น เนื่องจากสัญญาณเอ็มเอ็นอาร์ที่ได้จากหัววัด(Probe)ผ่านเครื่องขยายสัญญาณมีสัญญาณรบกวน(noise)รวมเข้ามาด้วย และเนื่องจากสัญญาณรบกวนมีการกระจายแบบสุ่ม เครื่องเฉลี่ยสัญญาณเฉลี่ยสัญญาณเอ็มเอ็นอาร์ทำให้สัญญาณรบกวนลดลง ขณะเดียวกันสัญญาณเอ็มเอ็นอาร์จะดีขึ้น หลังจากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์จะดึงข้อมูลในรูปของตัวเลขผ่านพอร์ทที่จัดเตรียมไว้นำไปวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลต่อไป

เครื่องเฉลี่ยสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้ ผลิตโดยบริษัทพรินตันแอฟพลายรีเสริช(Princeton Applied Research Coporation) มีช่องสัญญาณอยู่สองช่อง สามารถรับข้อมูลเป็นสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขได้อย่างอิสระต่อกันโดยสามารถต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ช่องละ 1024 ข้อมูล มีความละเอียดข้อมูลละ 24 บิท และมี 4 บิทสุดท้ายต่อเข้ากับ I/O Interface (Princeton, 1978)

<u>เครื่องกำเนิดพัลส์</u>(pulse generator)

ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมจังหวะ และช่วงเวลาการทำงานของระบบ หน้าที่หลัก คือควบคุมความกว้างของอาร์เอฟพัลส์และช่วงระยะห่างของแต่ละพัลส์ให้มีลักษณะเป็น 90° พัลส์หรือ 180°

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างเครื่องกำเนิดพัลส์ เพื่อทดลองเทคนิคสปินเอกโคแบบฮาม์น ( Hahn Spin echo)โดยเฉพาะ ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.2




VCC = +5V.

รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ในวงจรเครื่องกำเนิดพัลส์

จากรูปที่ 3.2 ไอซี1 TLC555CP ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibrator) ให้สัญญาณออกมาเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม(Squre Pulse)แบบต่อเนื่อง สามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้โดยการปรับ VR2 R2 และ C1 ให้สัมพันธ์กัน ในวงจรรวม VR2 ทำหน้าที่ปรับระยะห่างระหว่างพัลส์ (Pulse interval)

ไอซี2 เป็น ไอซีแบบ TTL เบอร์ 74LS121 เป็นโมโนสเตเบิล มัลติไวเบร์เตอร์(Monostable multivibrator) ที่มีอินพุตเป็นชมิตทริกเกอร์ มีตารางการทำงานดังตารางที่ 3.1

| INPUT | | | OUTPUT | |
|---|---|---|---|---|
| A1 | A2 | B | Q | $\overline{Q}$ |
| L | X | H | L | H |
| X | L | H | L | H |
| X | X | L | L | H |
| H | H | X | L | H |
| H | ↓ | H | ⎍ | ⎎ |
| ↓ | H | H | ⎍ | ⎎ |
| ↓ | ↓ | H | ⎍ | ⎎ |
| L | X | ↑ | ⎍ | ⎎ |
| X | L | ↑ | ⎍ | ⎎ |

เงื่อนไขที่เลือกใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการทำงานของไอซี 74LS121 (ซีเอ็ดยูเคชัน , 2529)

ลักษณะการทำงานของโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์คือ เมื่อมีสัญญาณกระตุ้นเข้ามาที่อินพุตตามเงื่อนไขที่กำหนดเอาท์พุตที่ขา Q และ $\overline{Q}$ จะมีการเปลี่ยนระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้าในทันที โดยที่ Q และ $\overline{Q}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ตรงกันข้าม เมื่อขา B ของไอซี2 เปลี่ยนสถานะจาก low เป็น high ขา Q จะให้เอาท์พุตเป็น high การเปลี่ยนนี้จะคงอยู่ช่วงเวลาหนึ่งซึ่งกำหนดโดยค่า VR และ C ที่ต่ออยู่กับไอซี โดย VR3 ทำหน้าที่ปรับความกว้างของพัลส์ชุดที่ 1

ไอซี 3 เป็นไอซแบบ TTL ภายในบรรจุไอซีโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จำนวน 2 ชุด ชุดที่หนึ่งจะให้เอาท์พุตเป็น high เมื่อเอาท์พุตของไอซี 2 เปลี่ยนสถานะจาก high เป็น low โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ของไอซี 3B จะให้เอาท์พุตที่ขา Q เป็น high เมื่อเอาท์พุตของไอซี 3A เปลี่ยนสถานะจาก high เป็น low โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ทั้งสองชุดสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้ด้วยการปรับ VR และ C ที่ต่อกับวงจรอยู่ โดยที่ VR4 ควบคุมความกว้างของพัลส์ชุดที่สอง VR1 ควบคุมระยะ

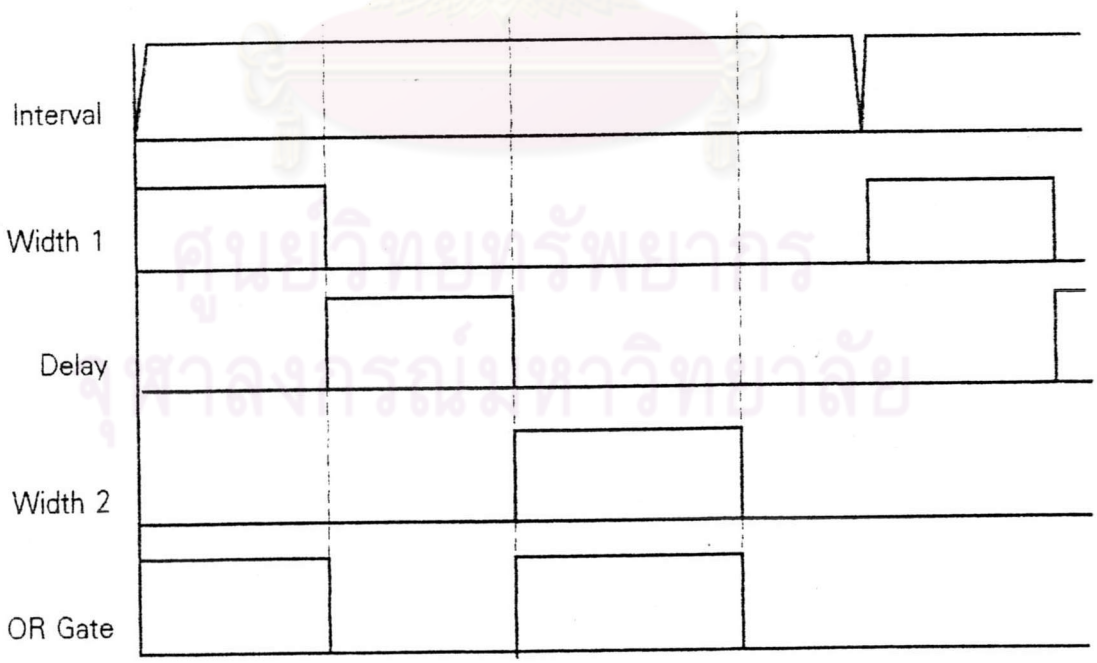
ห่างระหว่างพัลส์ชุดที่หนึ่งและพัลส์ชุดที่สอง(delay) และเงื่อนไขการทำงานของไอซี 3 แสดงในตารางที่ 3.2

| INPUT | | | OUTPUT | |
|---|---|---|---|---|
| CLEAR | A | B | Q | $\overline{Q}$ |
| L | X | X | L | H |
| X | H | X | L | H |
| X | X | L | L | H |
| H | L | ↑ | ⊓ | ⊔ |
| H | ↓ | H | ⊓ | ⊔ |

เงื่อนไขที่ใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการทำงานของ 74LS221 แต่ละตัว

ไอซี 4 เป็น ไอซีแบบ OR GATE ทำหน้าที่ OR สัญญาณที่เอาท์พุตของไอซี 2 และ ไอซี 3B การทำงานรวมของวงจรเครื่องกำเนิดพัลส์ แสดงได้รูปที่ 3.3



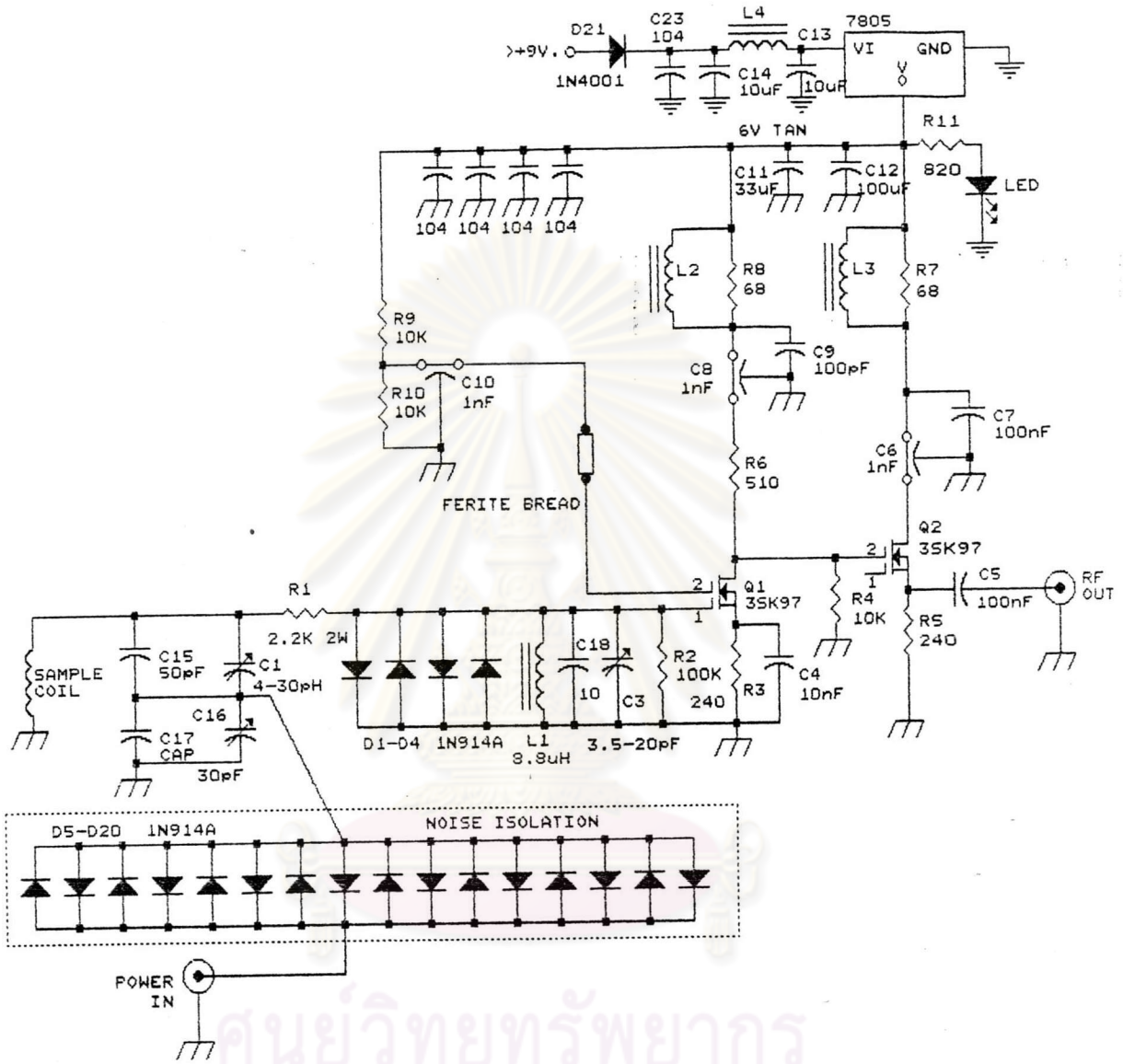

รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของวงจรเครื่องกำเนิดพัลส์

การสร้างโพรบ

โพรบถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก ภายในโพรบจะประกอบด้วยวงจรแทงค์(Tank Circuit) ของคอยล์ใส่ตัวอย่างเป็นหลักใหญ่ โพรบมีอยู่สองแบบใหญ่ๆคือ โพรบแบบคอยล์ไขว้ซึ่งจะมีทั้งคอยล์ส่งและคอยล์รับวางตั้งฉากกัน และโพรบแบบคอยล์เดี่ยว ซึ่งใช้คอยล์อันเดียวกันเป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณ สำหรับโพรบที่ใช้ในงานนี้เป็นแบบคอยล์เดี่ยว โดยปรับปรุงจากโพรบที่สร้างใช้งานเอ็นเอ็มอาร์สเปกโตรมิเตอร์ (ไพศาล ,2533)

เนื่องจากโพรบที่จากใช้ในห้องปฏิบัติการมีขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร ซึ่งใหญ่เกินไปที่จะใช้วัดความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กที่จุดต่างๆ จึงได้สร้างโพรบขึ้นมาใหม่ โดยออกแบบให้หัววัดมีขนาดเล็กกว่า 1 เซนติเมตร และต้องมีการชีลด์(Shielding)สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการออกแบบสร้างโพรบประการแรกคือ วัสดุทุกชิ้นที่ต้องอยู่ในสนามแม่เหล็กสถิตจะต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปรบกวนต่อสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น ประการที่สองคือ การแมทช์(Matching) เนื่องจากความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วงความถี่วิทยุการแมทชิ่งจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของการวัดสัญญาณมาก โดยทั่วไปอินพุทและเอาท์พุทของโพรบควรจะแมทช์ได้กับเครื่องขยายที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ประการที่สามคือการชีลด์สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่ทั่วไปอาจเหนี่ยวนำเข้ามาในส่วนที่มีอิมพีแดนซ์สูงได้ง่าย โดยเฉพาะที่คอยล์ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามากหากการชีลด์ไม่ดีพอ(ไพศาล, 2532) วงจรสมบูรณ์ของโพรบแสดงในรูปที่ 3.4




รูปที่ 3.4 วงจรของโพรบ

<u>การทำงานของโพรบ</u>

C1, C2 และ C15 และ เรโซแนนซ์คอยล์จะต่อกันแทปซี(Tapped-C) เพื่อแมทช์อิมพีแดนซ์ระหว่าง 50 โอห์ม และ 2.2 กิโลโอห์ม ในขณะที่มีอาร์เอฟพัลส์เข้ามา D1-D4 จะทำการช็อตที่ความต่างศักย์มากกว่า 1.2 $V_{p-p}$ ทำให้ R1 ต่อแบบขนานกับเรโซแนนซ์คอยล์ จึงประมาณได้ว่าที่ความถี่กำธรวงจรแทงค์(Tank Circuit) จะมีอิมพีแดนซ์ประมาณ R1 ซึ่งเป็นผลให้ค่าคิว(Q)ของระบบต่ำลง ช่วยลดการ

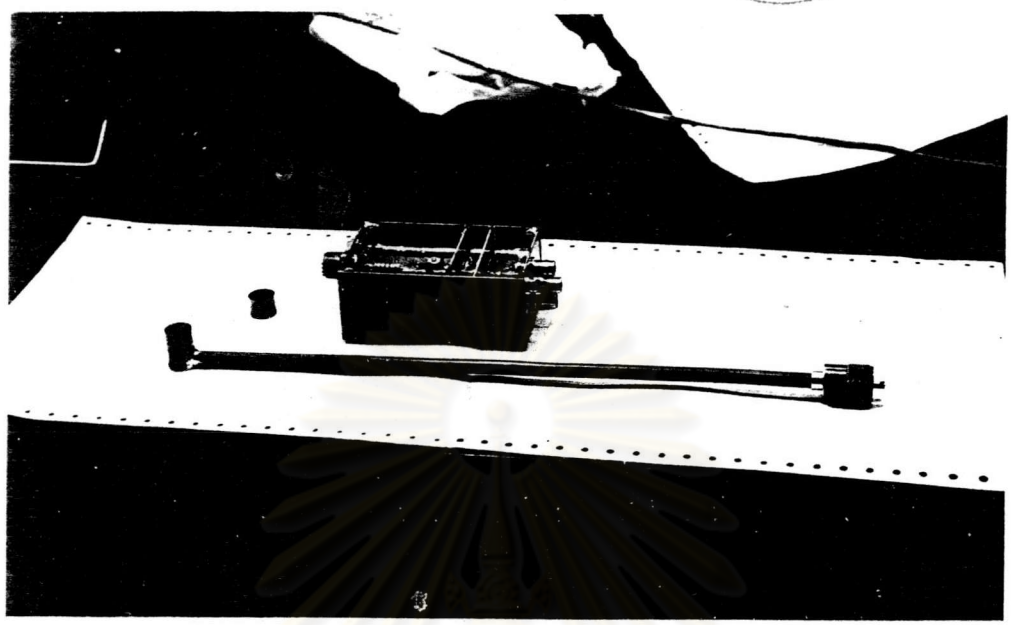
สะสมพลังงานของวงจรแทงค์หลังสิ้นสุดพัลส์ช่วยให้เดทไทม์(Dead Time)ของระบบสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อาร์เอฟพัลส์ที่มีกำลังมากกว่าปรกติเนื่องจากการสูญเสียไปกับ R1 หน้าที่อีกอย่างหนึ่งสำหรับ D1-D4 คือป้องกันไม่ให้ความแรงของอาร์เอฟพัลส์ผ่านเข้าไปทำลาย Q1 หลังจากสิ้นสุดพัลส์ D1-D4 จะมีอิมพิแดนซ์สูงมาก ทำให้วงจรแทงค์เป็นอิสระจาก R1 ค่าคิวของระบบจะสูงขึ้น สัญญาณจากการกำธรที่เหนี่ยวนำในคอยล์จะมีการสูญเสียน้อย Q1 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายที่อินพุทอิมพิแดนซ์สูงโดยคลับปลิง(Coupling)กับวงจรแทงค์ผ่านทาง R1 ซึ่งมีผลต่อสัญญาณน้อยมาก เนื่องจากเป็นภาคขยายหน้าสุด(Front End) Q1 จึงควรเป็นอุปกรณ์ที่มีนอยส์ฟิกเกอร์(Noise Figure)ต่ำที่สุดเท่าที่มีใช้ในท้องตลาดโดยทั่วได้คือ แกลเลี่ยมอาร์เซไนซ์มอสเฟทแบบเกทคู่(Dual Gate GaAs Mosfet) เบอร์ 3SK97 Q2 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สำหรับโหลดความต้านทานต่ำ(50 Ω) ทั้ง Q1 และ Q2 จะมีอัตราขยายประมาณ 7 dB D5-D20 ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นสัญญาณรบกวน(noise isolation)เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เหนี่ยวนำมากับสายส่งสัญญาณโดยยอมให้สัญญาณที่มี $V_{p-p}$ ที่มากกว่า 1.2 V. ผ่านไปได้ ข้อมูลทางเทคนิคแสดงในภาคผนวก ก.

<u>การสร้าง</u>

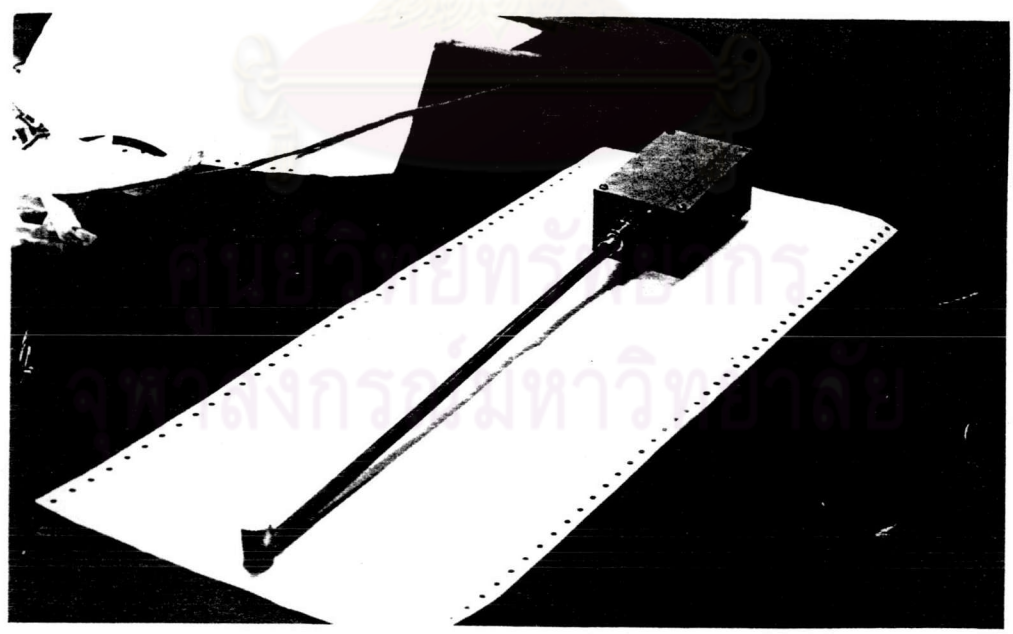
ตัวโพรบทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ นำมาตัดและประกอบเข้าด้วยกันเป็นกล่องโดยการบัดกรี เนื่องจากต้องการคอยล์ที่มีขนาดเล็ก จึงพันคอยล์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm. สูง 1.5 cm. มีจำนวนรอบ 15 รอบ ติดตั้งในส่วนปลายของโพรบ เนื่องจากขาของอุปกรณ์อิเลกทรอนิคส์เป็นสารแม่เหล็ก จึงติดตั้งให้ห่างออกมาจากคอยล์ประมาณ 35 cm. เชื่อมต่อกันด้วยลวดทองแดงจากสายสัญญาณอาร์เอฟหุ้มด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm. เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเข้าไปขณะสิ้นสุดการกำธร ในส่วนของปรีแอมป์ต้องมีการชีลด์อย่างดีระหว่างภาคขยาย แหล่งจ่ายไฟจะส่งกระแสผ่านฟีดทรูขึ้นมาจากข้างล่างของกล่อง และใช้ D21 ป้องกันการกลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟ โพรบที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของโพรบและส่วนของปรีแอมป์



รูปที่ 3.6 แสดงโพรบที่ประกอบเสร็จแล้ว

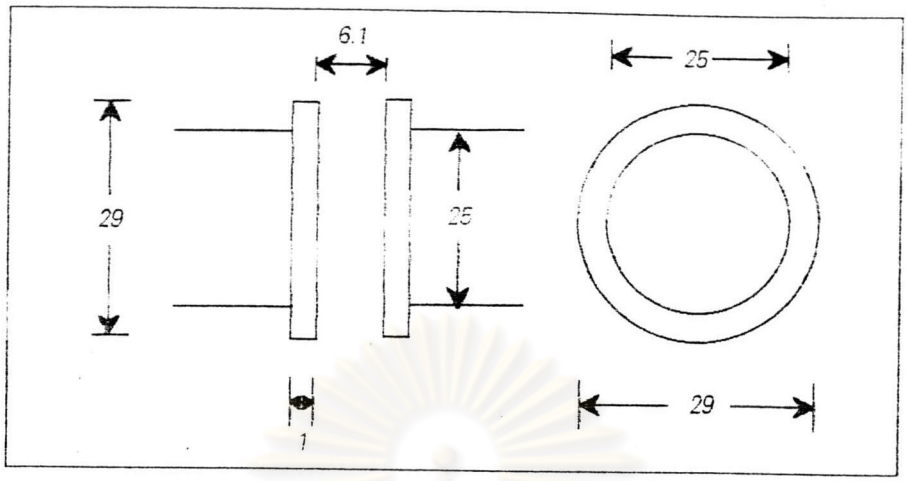
การใช้งาน

ก่อนการใช้งานต้องทำการจูน(Tune) โดยป้อนสัญญาณอาร์เอฟความถี่ 10 MHz ที่มีขนาดน้อยๆเข้าทางอินพุท ปรับ C1 C16 และC3 จนสัญญาณที่เอาท์พุทของปรีแอมป์มีขนาดใหญ่ที่สุด

3.2 การปรับแต่งสนามแม่เหล็ก

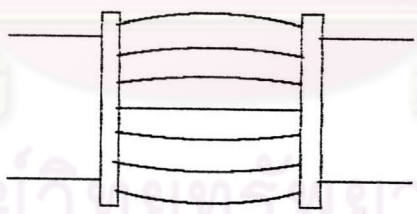
แม่เหล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเอ็นเอ็มอาร์ แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกนอากศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm. ในการทดลองปรับระยะห่างระหว่างขั้ว 6.1 cm. ลักษณะของแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8

รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของแม่เหล็กไฟฟ้า




รูปที่ 3.8 แผนภาพของแม่เหล็กไฟฟ้า ( หน่วย cm.)

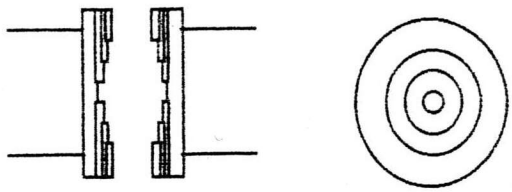
เนื่องจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีสมมาตรรอบแกน และเส้นปกติ(normal line)ที่poleขนานกับแนวแกน เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งตั้งออกจาก pole และป่องออกแล้วพุ่งเข้าตั้งฉากกับpoleอีกด้านหนึ่ง ทำให้ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กมีลักษณะเป็น ellipsiod เส้นแรงแม่เหล็กที่เบนออกจากแนวที่ขนานกับแกนเรียกว่า stray flux (Kroon, 1968) ดังรูปที่ 3.9



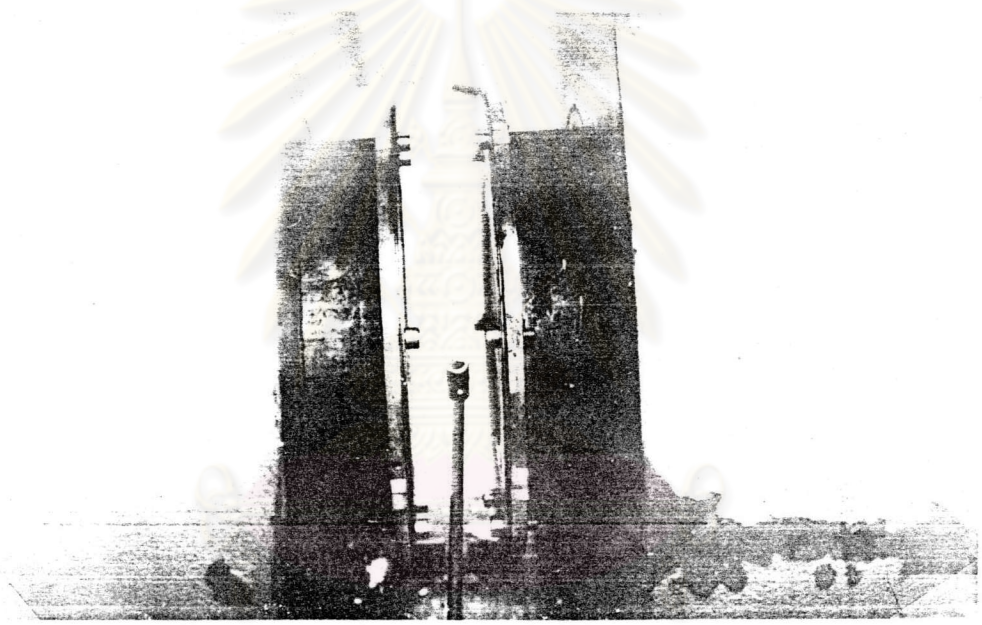
รูปที่ 3.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้า

การปรับ stray flux ให้เบนออกจากแนวน้อยลงทำได้โดยใส่แผ่นโลหะรูปวงแหวนที่เป็นสารแม่เหล็ก และมีรูปทรงเป็นพาราโบลอยด์ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขอบจะมีทิศเดียวกับเส้นปกติ ทำให้ stray flux จะเบนเข้ามาขนานกับแกนของแม่เหล็กมากขึ้น ลักษณะของแผ่นวงแหวนแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของแผ่นวงแหวน



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายแผ่นวงแหวนที่ติดตั้งบนขั้วแม่เหล็กแล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย