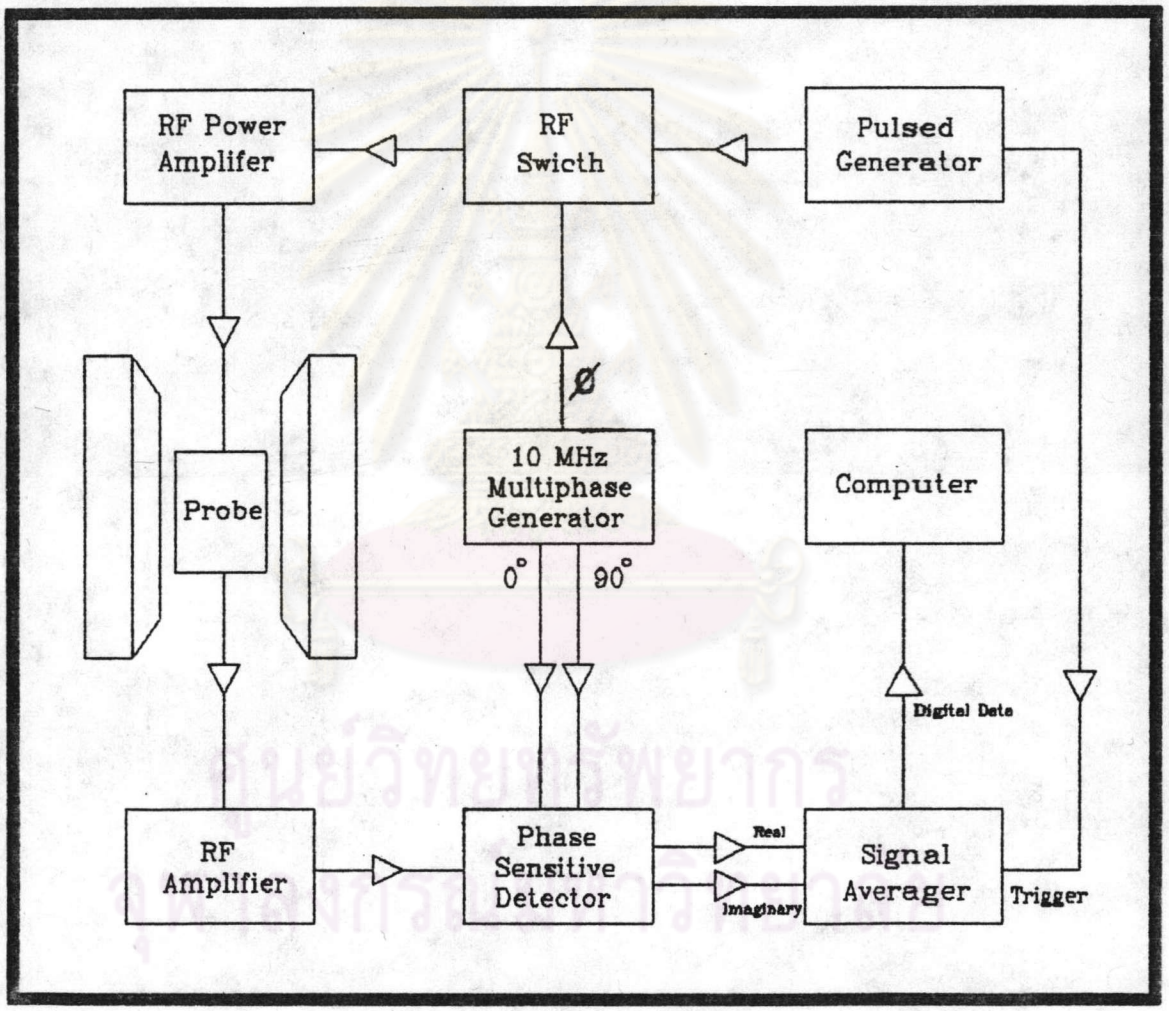
บทที่ 3

การสร้างเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์

3.1 โครงสร้างและการทำงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังของเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์

เอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์โดยทั่วๆไปจะมีโครงสร้างที่คล้ายๆกันคือ ประกอบด้วยแม่เหล็ก ภาคส่งสัญญาณกระตุ้น โพรบ ภาครับสัญญาณ ภาคประมวลผล จะต่างกันไปก็ในรายละเอียดการรวมหรือแยกส่วนของเครื่องมือในแต่ละภาค ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละงาน การรวมเครื่องมือให้เหลือน้อยชิ้นก็จะทำให้ง่ายต่อการใช้งาน แต่ไม่ยืดหยุ่นต่อการพัฒนาระบบ การแยกมากชิ้นเกินไปก็จะทำให้การเชื่อมต่อสายของระบบยุ่งยากซับซ้อนไม่สะดวกต่อการใช้งาน ระบบที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3.1

การทำงานโดยย่อของระบบเริ่มจาก เครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟสความถี่ 10 MHz (10 MHz Multiphase generator) ส่งสัญญาณผ่านอาร์เอฟสวิทช์(RF Switch) โดยมีเครื่องกำเนิดพัลส์(Plused Generator)เป็นตัวควบคุมจังหวะและความกว้างของการเปิดปิดสวิทช์ อาร์เอฟพัลส์ที่ได้(มีความกว้างระดับ μs) จะถูกขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น(มีกำลังระดับ 10^2 W)โดยเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ(RF Power Amplifier) และจะส่งเข้าไปที่เรโซแนนซ์คอยล์ซึ่งอยู่ภายในโพรบ(Probe) สัญญาณที่ได้จากการเรโซแนนซ์จะถูกเหนี่ยวนำขึ้นในคอยล์อันเดียวกัน(มีขนาดระดับμV) ปรีแอมปริฟลายเออร์(Preamplifier ; อัตราขยาย $\simeq$ 7 dB) ภายในโพรบจะขยายสัญญาณและปรับสภาพอิมพีแดนซ์ของสัญญาณให้เหมาะสมก่อน แล้วจึงส่งต่อไปให้เครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟ(RF Amplifier ; อัตราขยาย $\simeq$ 60 dB) เพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อสัญญาณมีขนาดใหญ่พอจะถูกส่งไปตรวจหาด้วยเฟสเซนซิทีฟดีเทคเตอร์ (Phase Sensitive Detector)โดยมีสัญญาณอ้างอิงที่มีเฟส 0 และ 90 องศา จากเครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟสความถี่ 10 MHz สัญญาณเชิงซ้อนที่ได้จากการตรวจหาจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแบบดิจิตอล และทำการเฉลี่ยสัญญาณจากการตรวจหาหลายๆครั้งด้วยเครื่องเฉลี่ยสัญญาณ (Signal Averager) เป็นผลให้สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) มีขนาดลดลง สัญญาณที่เฉลี่ยแล้วจะถูกส่งไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์เป็นขั้นตอนสุดท้าย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่ขอกล่าวถึงเครื่องเฉลี่ยสัญญาณและคอมพิวเตอร์

3.2 แม่เหล็ก

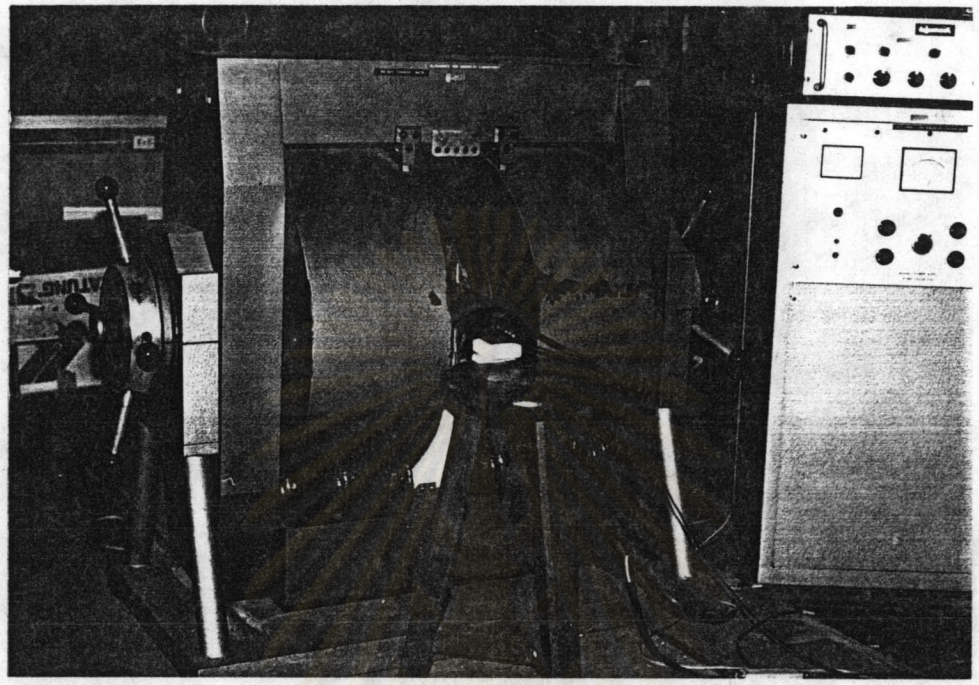
แม่เหล็กที่ใช้ในทางเอ็นเอ็มอาร์มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

แม่เหล็กถาวร แม่เหล็กถาวรมีข้อได้เปรียบคือ มีสนามแม่เหล็กที่มีเสถียรภาพสูง การเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับอุณหภูมิมีน้อยมาก ข้อจำกัดของแม่เหล็กถาวรคือ ถ้าต้องการความแรงของสนามมากกว่าประมาณ 1.4 เทสลา อัตราการเพิ่มขนาดของแม่เหล็กต่อการเพิ่มของสนามจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

แม่เหล็กไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบ คือ มีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานสูงสามารถปรับความแรงของสนามได้ง่าย สามารถผลิตสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอในบริเวณกว้าง ข้อจำกัดของแม่เหล็กไฟฟ้าคือ สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแกนเหล็กจะไม่สามารถให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 2.3 เทสลา

แม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด แม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดสามารถให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงในบริเวณกว้าง เสถียรภาพสูงเหมือนกับแม่เหล็กถาวร ข้อเสียคือ ค่าบำรุงรักษาและราคายังสูงเกินไป

แม่เหล็กที่ใช้ในงานนี้เป็นชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก ระบายความร้อนด้วยน้ำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็กประมาณ 1 ฟุต ผลิตโดยบริษัท บรุคเกอร์(Bruker) รุ่น B-E 25 C8 มูลนิธิ อเลกซานเดอร์ ฟอน ฮัมโบลท์ (Alexander Von Humboldt) มอบให้แก่ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี ค.ศ. 1969 มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่เหล็กที่ใช้กับเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์

3.3 เครื่องกำเนิดพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมจังหวะ และช่วงเวลาการทำงานของระบบ หน้าที่หลักก็คือควบคุมความกว้างของอาร์เอฟพัลส์และช่วงระยะห่างของแต่ละพัลส์ เครื่องกำเนิดพัลส์แบบใหม่ๆจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์เรียกว่า พัลส์โปรแกรมเมอร์(Pulsed Programmer) พัลส์ที่ใช้ควบคุมอาร์เอฟสวิทช์โดยทั่วไปจะมีระดับสัญญาณแบบทีทีแอล(TTL) ช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมความกว้างของอาร์เอฟพัลส์ควรปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 1 μs - 1 ns และปรับความละเอียดได้ระดับ 1 μs นั่นคือต้องใช้ฐานเวลาที่มีความถี่ 10 MHzเป็นอย่างน้อย ช่วงเวลาที่ใช้ควบคุมระยะห่างระหว่างพัลส์ควรปรับได้ตั้งแต่ 100 μs - 1 s สำหรับเครื่องที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะไม่ขอกล่าวถึงในรายละเอียด

3.4 การสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟส 10 MHz

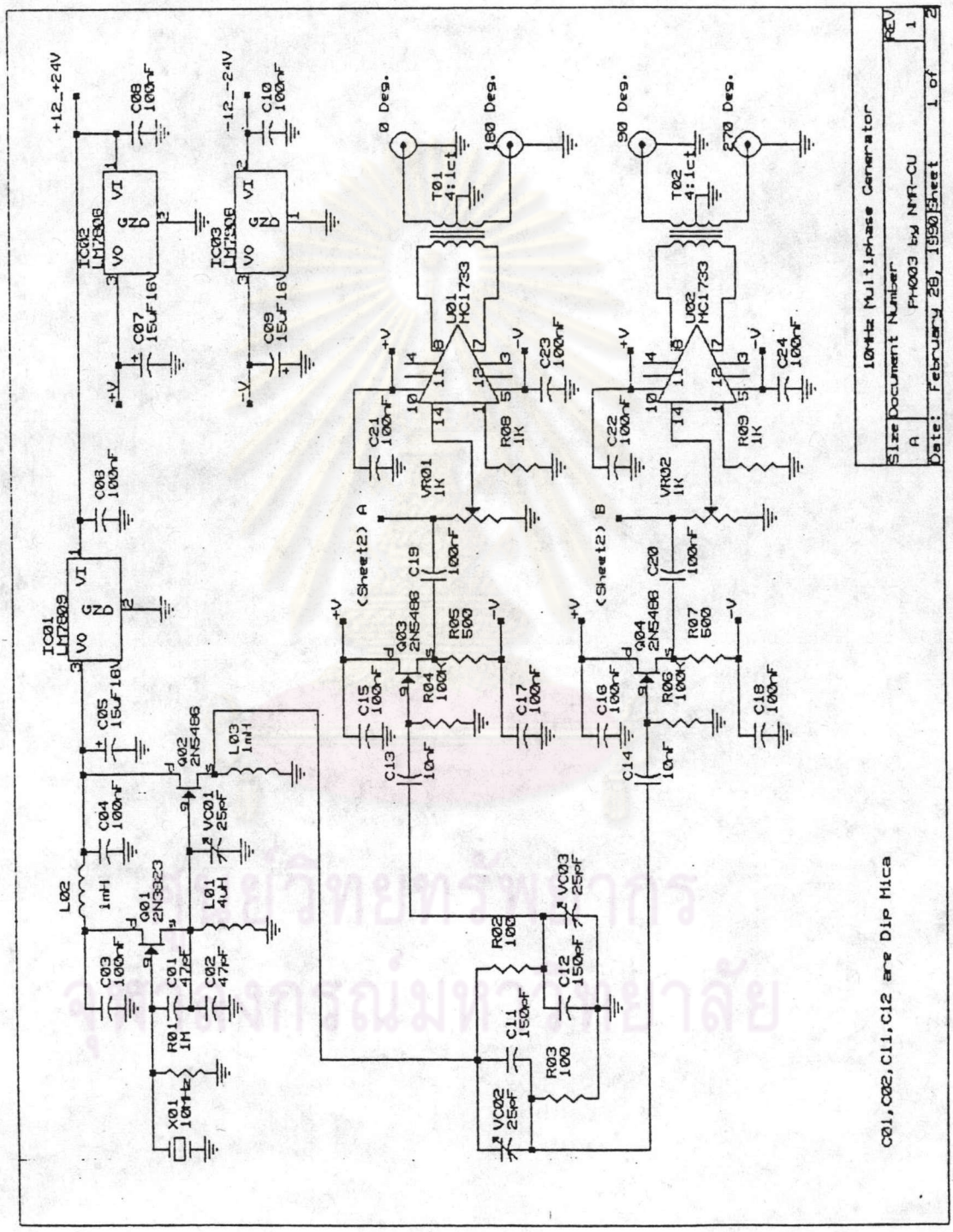
เอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์ ต้องการคลื่นอาร์เอฟที่มีเสถียรภาพทางความถี่ดีเพื่อใช้สำหรับเป็นพัลส์กระตุ้น และเป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับการตรวจหาสัญญาณจากการเรโซแนนซ์ สัญญาณที่ใช้อ้างอิงจะมีสองเฟสที่ต่างกัน 90 องศาเพื่อใช้ตรวจหาสัญญาณในแบบ u และแบบ v การทดลองที่ซับซ้อนบางอย่างก็จำเป็นที่ต้องใช้อาร์เอฟพัลส์ที่มีหลายเฟสในการกระตุ้น

เครื่องกำเนิดคลื่นอาร์เอฟที่สร้างขึ้น ถูกออกแบบให้มีสัญญาณออก 8 ช่อง 4 ช่องแรกจะให้สัญญาณที่มีเฟสคงที่ 0, 90, 180 และ 270 องศา อีก 4 ช่องจะให้สัญญาณเหมือนชุดแรกแต่สามารถปรับเลื่อนเฟสได้เล็กน้อยพร้อมกันทีละสองช่อง วงจรของเครื่องแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4

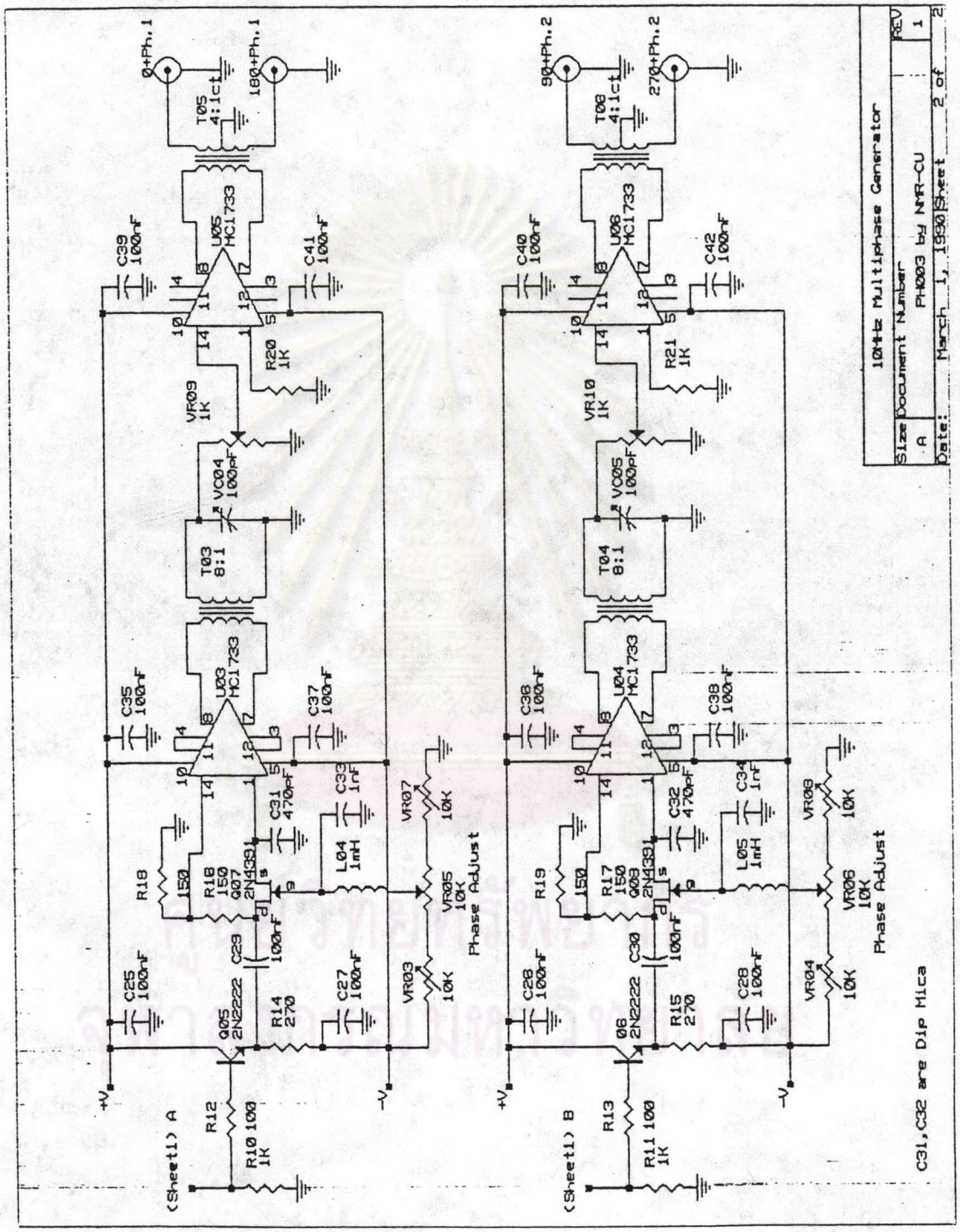
การทำงานของเครื่อง

การทำงานของเครื่องเริ่มจาก คริสตอล X01 และ Q01 ทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิทส์(Colpitts) กำเนิดสัญญาณความถี่ 10 MHz Q02 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ สัญญาณ 10 MHz จะถูกแบ่งให้ได้สัญญาณที่มีเฟส 0 และ 90 องศาโดย R03, R02, C11, C12, VC02 และ VC03 Q03 และ Q04 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ สัญญาณจะถูกแยกออกเป็นสองทางโดยชุดแรกจะส่งไปให้ U01 และ U02 เพื่อขยายกำลังและให้สัญญาณออกที่มีเฟส 0, 90, 180 และ 270 องศา ชุดที่สอง(รูปที่3.4) จะถูกนำไปผ่านวงจรเลื่อนเฟส(Phase Shifter) โดยมี Q05 และ Q06 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ Q07 และ Q08 จะถูกใช้เป็นตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ตามความต่างศักย์ในเน็ทเวิร์คของวงจรเลื่อนเฟส โดยมี U03 และ U04เป็นตัวขยายความแตกต่างของเน็ทเวิร์คทำงานที่อัตราขยายสูง(G_v = 400) เนื่องจำกัดขนาดของสัญญาณออกให้คงที่ขณะทำการปรับเลื่อนเฟส การปรับเลื่อนเฟสทำได้โดยปรับที่ VR05 และ VR06 ช่วงของการเลื่อนเฟสสามารถปรับได้ที่ VR0, VR04, VR07 และ VR08 สัญญาณที่ทำการปรับเลื่อนเฟสแล้วจะถูกส่งไปให้ U05 และ U06 เพื่อขยายกำลังและให้สัญญาณออกที่มีเฟส 0+เฟส 1, 180+

เฟส 1, 90+เฟส 2 และ 270+เฟส 2 ขนาดของสัญญาณออกทั้งสองชุดสามารถปรับให้เท่ากันได้ที่ VR01, VR02, VR09 และ VR10



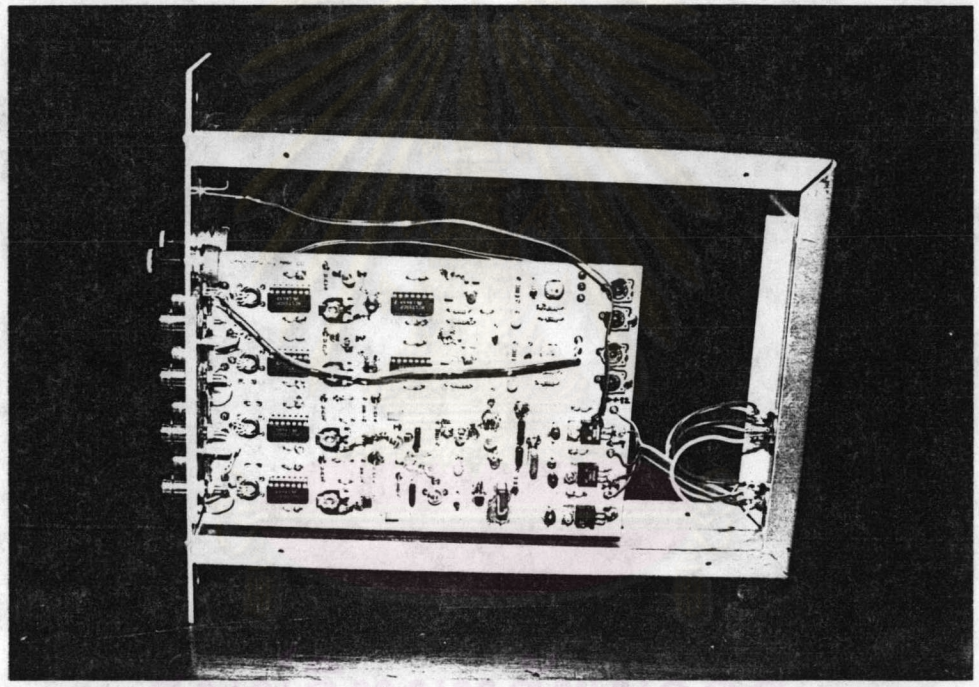
รูปที่ 3.3 วงจรเครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟส 10 MHz (แผ่นที่ 1)



รูปที่ 3.4 วงจรเครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟส 10 MHz (แผ่นที่ 2)

การสร้าง

ตัววงจรออกแบบให้อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบสองหน้าโดยใช้แผ่นทองแดงด้านวางอุปกรณ์เป็นกราวด์เพลน ขาของอุปกรณ์ที่ลงกราวด์จะบัดกรีโดยตรงบนกราวด์เพลน(ตำแหน่งที่มีเครื่องหมาย X) ตำแหน่งการวางอุปกรณ์และลายวงจรพิมพ์ทั้งสองหน้าดูได้จากภาคผนวก ข. เครื่องที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟส 10 MHz ที่สร้างเสร็จ

การใช้งาน

การนำไปใช้งานต้องมีการปรับเทียบให้สัญญาณออกทั้ง 8ช่องมีขนาดเท่าๆกัน($\simeq 1V_{p-p}$) โดยปรับที่ VR01,VR02,VR09 และ VR10 ผลการตรวจสอบที่โหลด 50 โอห์มเครื่องให้คลื่น

ที่มีเสถียรภาพทางความถี่ดี แต่รูปคลื่นยังมีการผิดรูปไปจากรูปคลื่นแบบไซน์(Sine Wave) สาเหตุคงเนื่องมาจากการแมชชิ่งที่ไม่ดีพอ การปรับเลื่อนเฟสของเครื่องทำได้อยู่ในช่วงประมาณ $\pm$ 20 องศา จากการนำไปใช้ในเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์ไม่พบผลผิดปรกติจากรูปคลื่นที่ไม่ใช่ไซน์ ผลเป็นที่น่าพอใจ

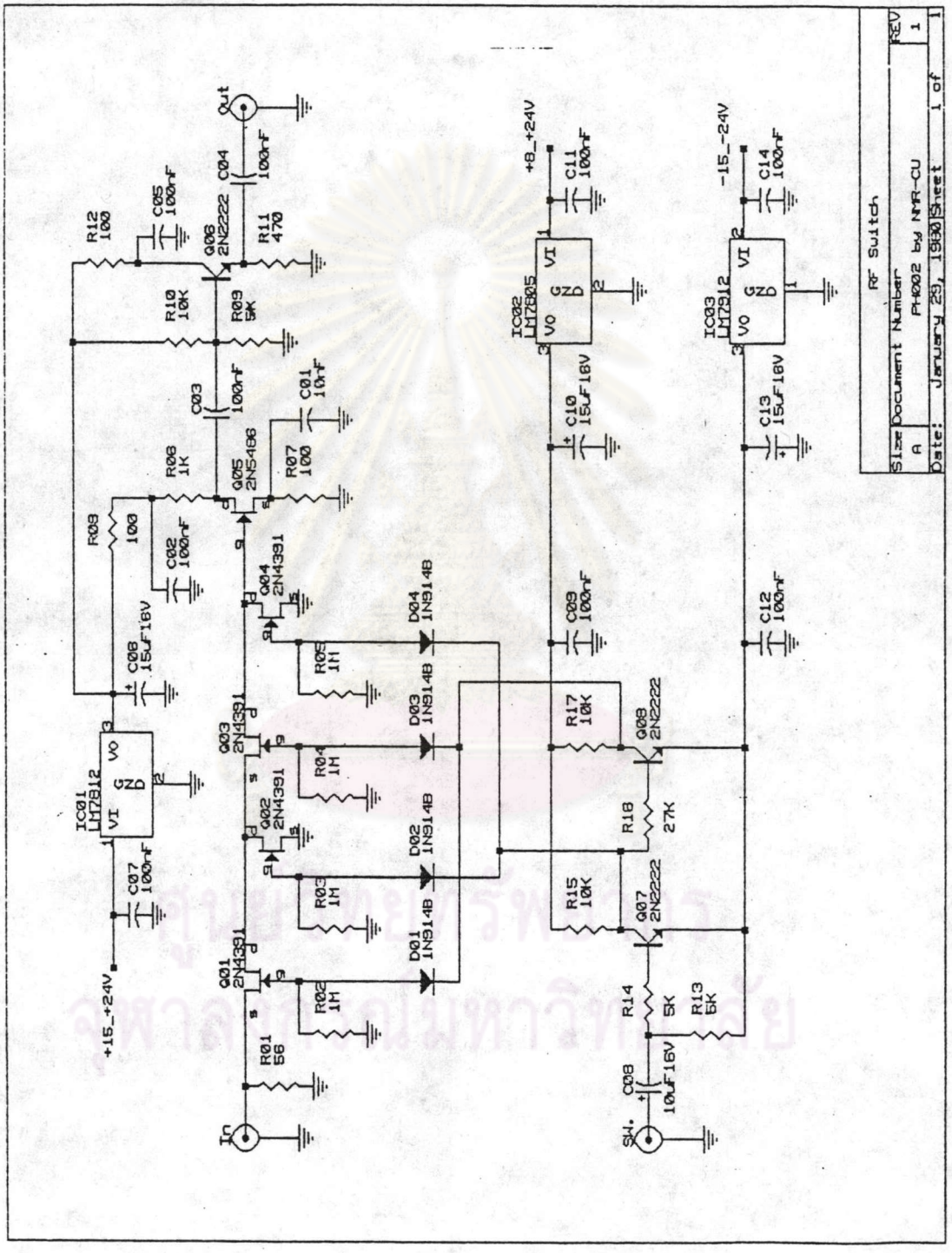
3.5 <u>การสร้างอาร์เอฟสวิทช์</u>

อาร์เอฟสวิทช์ หรือ อาร์เอฟเกท (RF Gate)เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเปิดปิดสัญญานอาร์เอฟจากเครื่องกำเนิดคลื่นอาร์เอฟตามการควบคุมของเครื่องกำเนิดพัลส์ คล้ายกับการมอดดูเลตสัญญานด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความสามารถในการปิดกั้นสัญญาณอาร์เอฟจะมีผลต่อความไวของเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์มาก สัญญาณที่หลุดรอดไปเพียงน้อยนิดจะถูกขยายที่ภาคขยายในส่วนต่างๆของระบบจนกลบสัญญาณเรโซแนนซ์ได้ อาร์เอฟสวิทช์แบบมอดดูเลเตอร์(Modulator)ลดสัญญาณลงได้ประมาณ 50 dB ในขณะที่อาร์เอฟสวิทช์ที่ใช้เฟ็ทเป็นสวิทช์สามารถลดสัญญานลงได้มากกว่า 100 dB วงจรอาร์เอฟสวิทช์ที่สร้างขึ้นเป็นชนิดที่ใช้เฟ็ทแสดงในรูปที่ 3.6

<u>การทำงานของเครื่อง</u>

Q01, Q02, Q03 และ Q04 ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ควบคุมการเปิดปิดด้วยความต่างศักย์ที่ขาเกทของเฟ็ท ที่ความต่างศักย์เป็นศูนย์เฟ็ทเบอร์ 2N4391จะมีความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ซต่ำเพียง 30 โอห์มเป็นสถานะเปิด ที่ความต่างศักย์น้อยกว่า - 10 V อิมพีแดนซ์ระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ซมีจะมีค่าสูงมาก(C_{d-s} < 0.2 pF)เป็นสถานะปิด สถานะของเฟ็ททั้งสี่จะถูกควบคุมโดย Q07 และ Q08 ซึ่งถูกควบคุมโดยสัญญาณพัลส์จากภายนอก โดยการต่อเฟ็ทในลักษณะวงจรแบ่งความต่างศักย์สองช่วง ขณะที่สัญญาณอินพุทจากภายนอกเป็นศูนย์ Q01 และ Q03 จะอยู่ในสถานะปิด Q02 และ Q04 จะอยู่ในสถานะเปิด สัญญานจากอินพุทจะผ่านไปได้น้อยมาก ขณะที่สัญญาณอินพุทจากภายนอกเป็น 5 V Q01 และ Q03 จะอยู่ในสถานะเปิด

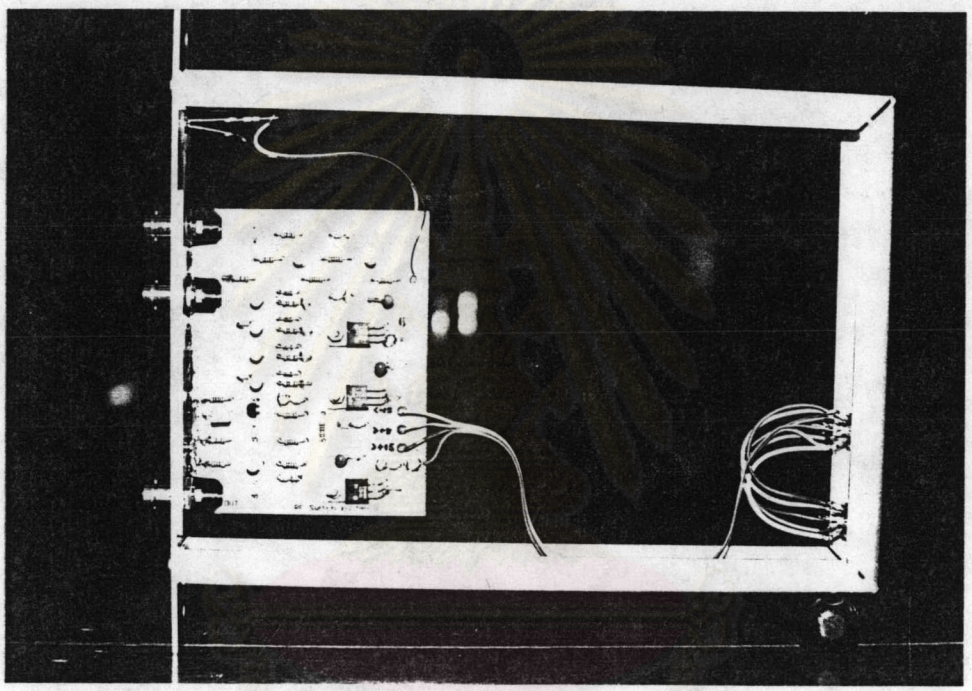
Q02 และ Q04 อยู่ในสถานะปิด สัญญาณจากอินพุทจะผ่านไปได้เกือบทั้งหมด Q05 และ Q06 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณชดเชยที่สูญเสียไปกับ Q01-Q04



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรของอาร์เอฟสวิทช์

การสร้าง

อุปกรณ์ติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบสองหน้า มีกราวด์เพลน ออกแบบให้ทางเดินของสัญญาณสั้นและตรงเพื่อลดการเหนี่ยวนำของสัญญาณผ่านไปได้ขณะที่สวิทช์ปิด ลายวงจรพิมพ์และตำแหน่งการวางอุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ข. เครื่องที่ประกอบเสร็จแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อาร์เอฟสวิทช์ที่สร้างเสร็จ

การใช้งาน

สัญญาณที่ใช้ควบคุมการเปิดปิดของสวิทช์มีขนาดมาตราฐานของทีทีแอล(TTL) ขณะที่สัญญาณเป็นลอจิก 0 อาร์เอฟสวิทช์สามารถกั้นสัญญาณอาร์เอฟ 10 MHz 1 V_{p-p} ได้สนิท ขณะที่สัญญาณควบคุมเป็นลอจิก 1 (ช่วงเวลาน้อยกว่า 1 ns) สัญญาณอาร์เอฟจะถูกขยายขึ้นประมาณ 3 dB เมื่อนำไปใช้ในเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์พบว่า ขณะที่เปิดและปิดพัลส์มีสัญ

ญาณกระชากเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่ผลอันนี้จะถูกกำจัดออกได้โดยสมบัติการเรโซแนนซ์ของวงจรแทงค์(Tank Circuit)ภายในโพรบ(Probe)

3.6 <u>การสร้างเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ</u>

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกระดับกำลังของเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟก็คือ ประสิทธิภาพของระบบคอยล์ซึ่งขึ้นกับค่าคิว (Q : Quanlity Factor) ขนาดของคอยล์ ค่าเวลาของพัลส์ 90 องศาซึ่งพิจารณาจากสนามแม่เหล็ก H_1 ในคอยล์จะแปรตรงกับค่ากำลังของอาร์เอฟยกกำลังสอง นั่นคือ ถ้าต้องการให้ H_1 เพิ่มเป็นสองเท่าก็ต้องเพิ่มกำลังของอาร์เอฟเป็นสี่เท่า เนื่องจากความกว้างของอาร์เอฟพัลส์ยิ่งสั้นก็ยิ่งทำให้สเปกตรัมมีช่วงกว้าง เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟที่ใช้ในทางเอ็นเอ็มอาร์แบบพัลส์จึงควรจะมีช่วงการตอบสนองความถี่กว้างพอที่จะสามารถตอบสนองต่อรูปร่างพัลส์ได้ดี ในขณะที่เครื่องถูกใช้งานแบบพัลส์ มันสามารถให้กำลังได้มากกว่า 10 เท่าของกำลังแบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วการทดลองที่ใช้โพรบแบบคอยล์เดี่ยวจะต้องการกำลัง 50 - 100 W สำหรับพัลส์ 90 องศาที่มีความกว้างระดับ 20 µs [1]

เครื่องที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เครื่องแรกขยายกำลังได้ 15 W ใช้สำหรับเป็นตัวขับ(Driver) รายละเอียดต่างๆทั้งหมดอยู่ในเอกสารอ้างอิง [13] เครื่องที่สองขยายกำลังได้ 140 W รายละเอียดต่างๆทั้งหมดอยู่ในเอกสารอ้างอิง [6] ทั้งสองเครื่องตอบสนองความถี่ระหว่าง 2-30 MHz วงจรเครื่องแรกแสดงในรูปที่ 3.8 วงจรเครื่องที่สองแสดงในรูปที่ 3.9

<u>การทำงานของเครื่อง</u>

เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 15 W แบ่งเป็นสามภาค ภาคแรกทำงานแบบคลาสเอ ภาคที่สองและสาม ทำงานแบบพุชพูล(Push-Pull)ในคลาสบี กระแสที่สภาวะสงบรวมกันประมาณ 350 mA มีอัตราขยายกำลัง 40 dB(min) ต้องการอินพุทประมาณ 1 mW และ

แหล่งจ่ายกำลังไฟ 13.8 V 4 A สำหรับเอาท์พุท 15 W แบบต่อเนื่อง

เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 140 W มีภาคขยายภาคเดียวทำงานแบบพุชพูล(Push-Pull)คลาสบี มีอัตราขยายกำลัง 15 dB ต้องการอินพุท 5W และแหล่งจ่ายกำลังไฟ 13.8 V 25 A สำหรับเอาท์พุท 140W แบบต่อเนื่อง

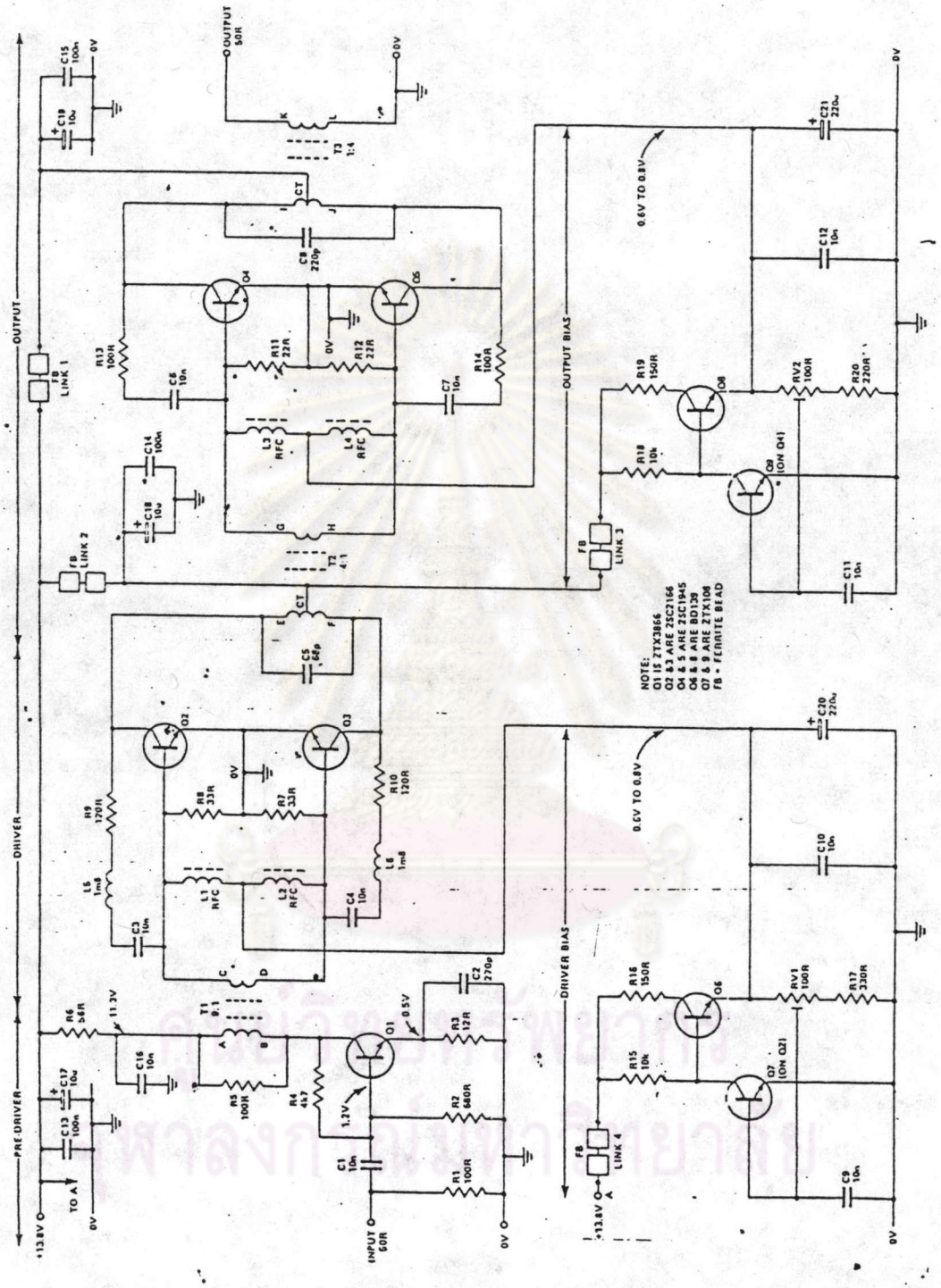
<u>การสร้าง</u>

ตัวแผ่นวงจรพิมพ์และทรานซิสเตอร์กำลังจะติดบนแผ่นระบายความร้อน พบว่าในการใช้งานในเอ็นเอ็มอาร์แบบพัลส์กำลังสูญเสียจะน้อย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นระบายความร้อนที่ใหญ่มากก็ได้ ลายวงจรพิมพ์และการวางอุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ข. เครื่องที่สร้างเสร็จแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11

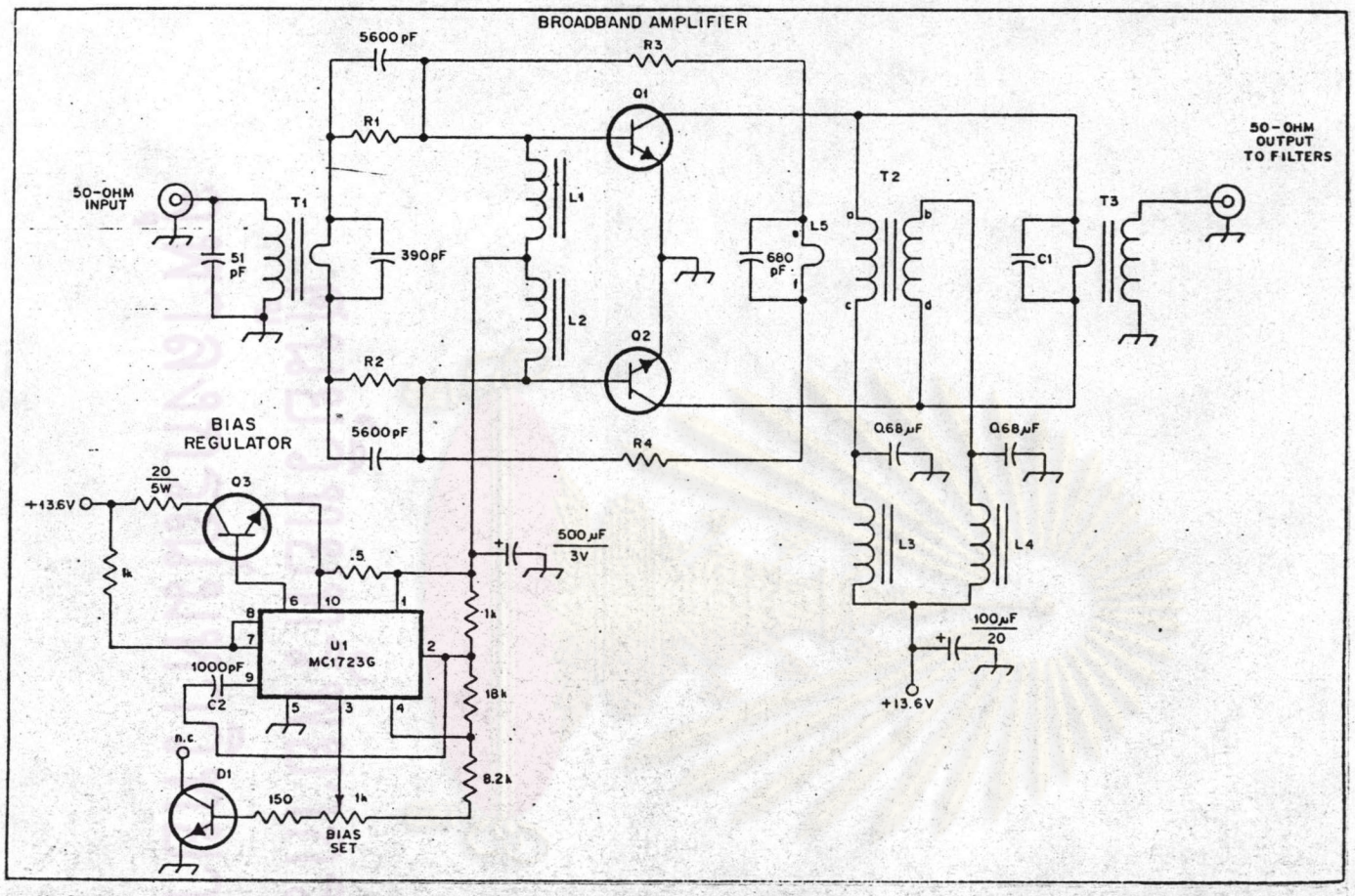
<u>การใช้งาน</u>

จากการนำไปใช้กับเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรมิเตอร์แบบพัลส์ ที่พัลส์สั้นๆ สามารถให้กำลังถึง 250 W สำหรับเครื่อง 15 W และให้กำลังถึง 5 KW สำหรับการเพิ่มเครื่อง 140 W เข้าไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

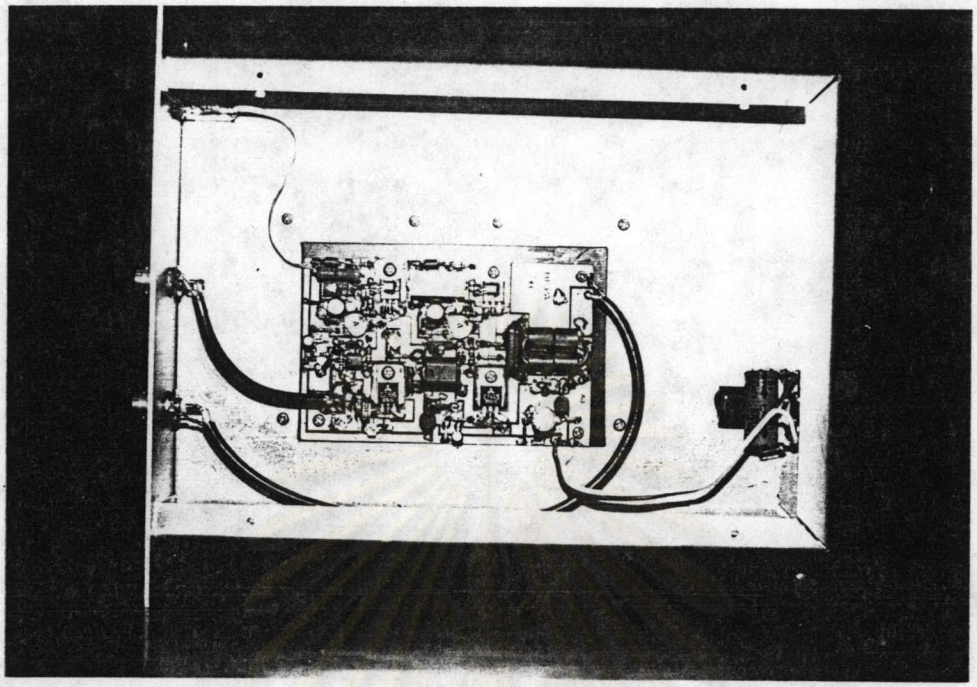


รูปที่ 3.8 วงจรเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 2-30 MHz 15 W

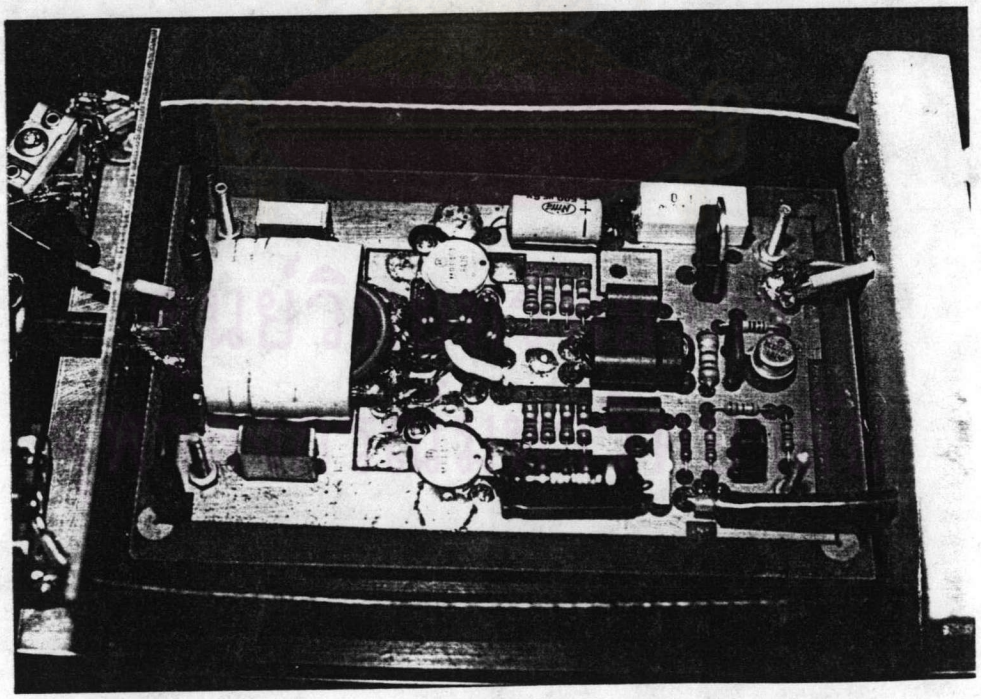


— Circuit diagram of the 140-watt amplifier. All capacitors except part of C1, C2 and the electrolytic types are ceramic chips. Capacitors with values higher than 82 pF are Union Carbide type 1225 or Varadyne size 14. Others are type 1813 or size 18, respectively. A full-size PC etching pattern appears at the back of this book.

C1 — 1760 pF (two 470-pF chip capacitors in parallel with an 820-pF silver mica).
C2 — 1000-pF disc ceramic.
D1 — 2N5190 or equiv.
L1, L2 — Ferrite choke, Ferroxcube VK200 19/4B.
L3, L4 — Two Fair-Rite Products ferrite beads (2673021801 or equiv.) on no. 16 wire.
L5 — 1 turn through toroid of T2.
Q1, Q2 — MRF454.
Q3 — 2N5989 or equiv.
R1, R2 — Two 3.6 ohm, ½ W, in parallel.
R3, R4 — Two 5.6 ohm, ½ W, in parallel.
T1 — Primary: 3 turns no. 22 insulated wire. Secondary: Braid or tubing loop. Core material: Stackpole 57-1845-24B, Fair-Rite Products 2873000201 or two Fair-Rite Products 0.375-inch-OD × 0.2 inch ID × 0.4 inch. Material-77 beads for type A transformer.
T2 — 6 turns no. 18 enameled wire, bifilar wound. Ferrite core: Stackpole 57-9322, Indiana General F627-8 Q1 or equiv.
T3 — Primary: Braid or tubing loop. Secondary: 4 turns no. 18 insulated wire. Core material: Two Stackpole 57-3238 ferrite sleeves (7D material) or a number of toroids with similar magnetic characteristics and 0.175-inch sq. total cross sectional area.
U1 — Motorola MC1723G or equiv.



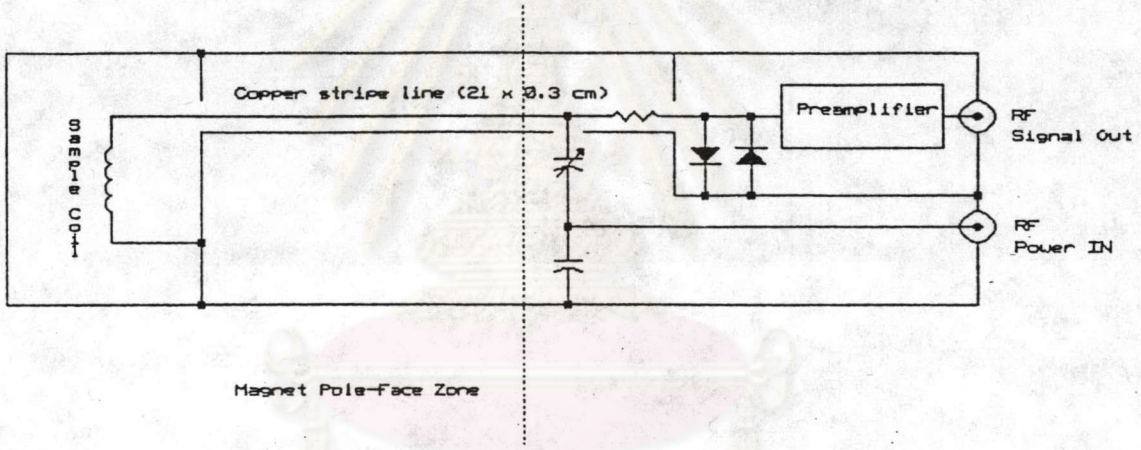
รูปที่ 3.10 เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 15 W ที่สร้างเสร็จ



รูปที่ 3.11 เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 140 W ที่สร้างเสร็จ

3.7 การสร้างโพรบ

โพรบถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก ภายในโพรบจะประกอบด้วยวงจรแทงค์(Tank Circuit)ของคอยล์ใส่ตัวอย่างเป็นหลักใหญ่ โพรบมีอยู่สองแบบใหญ่ๆคือ โพรบแบบคอยล์ไขว้ซึ่งจะมีทั้งคอยล์ส่งและคอยล์รับวางตั้งฉากกัน และโพรบแบบคอยล์เดี่ยว ซึ่งใช้คอยล์อันเดียวกันเป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณ สำหรับโพรบที่ใช้ในงานนี้เป็นแบบคอยล์เดี่ยว แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปแบบของโพรบที่สร้าง

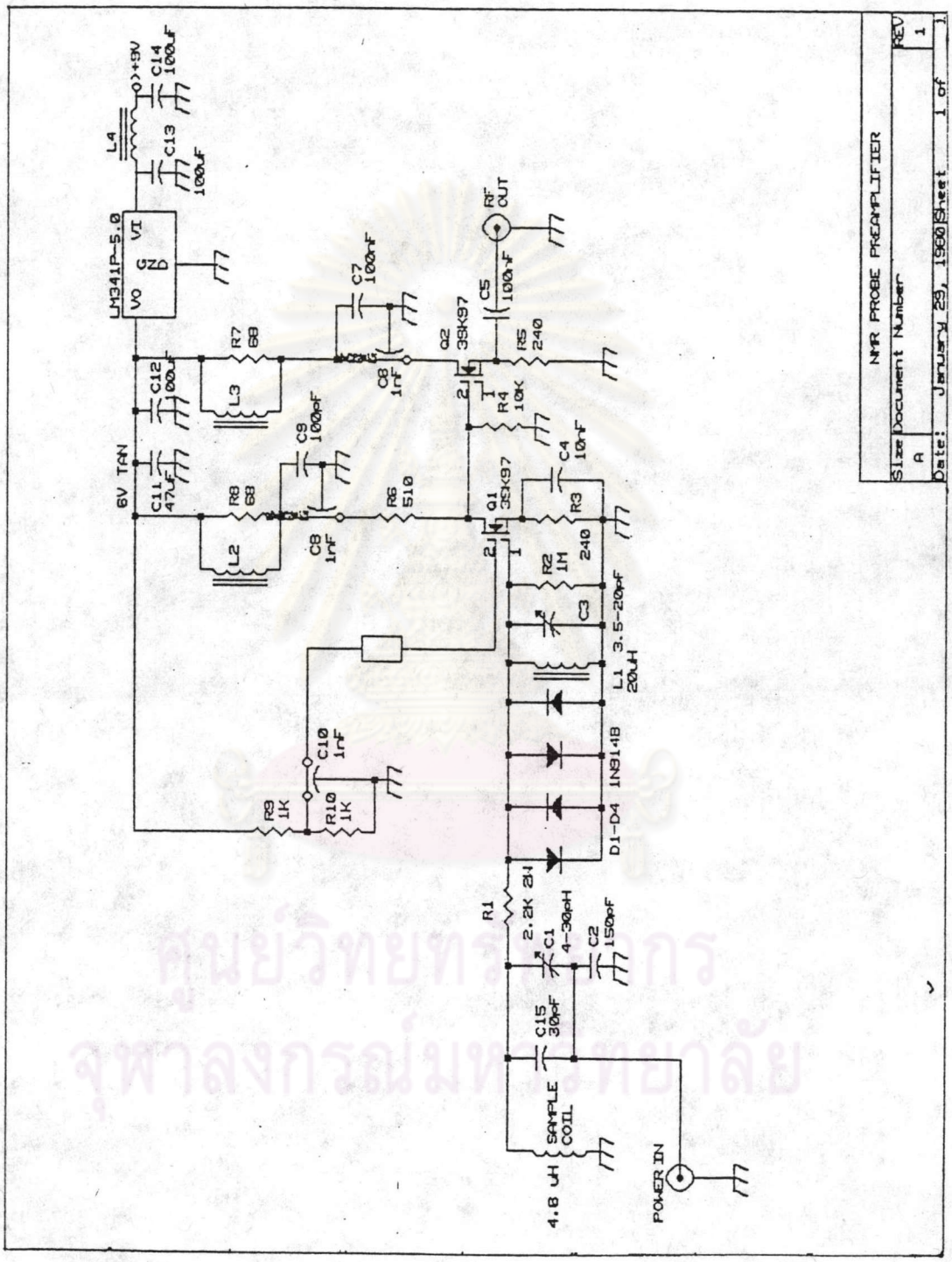
สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการออกแบบสร้างโพรบประการแรกคือ วัสดุทุกชิ้นที่ต้องอยู่ในสนามแม่เหล็กสถิตจะต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปรบกวนต่อสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น ประการที่สองคือ การแมทช์(Matching) เนื่องจากความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วงความถี่วิทยุ การแมทชิ่งจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของการวัดสัญญาณมาก โดยทั่วไปอินพุทและเอาท์พุทของโพรบควรจะแมทช์ได้กับเครื่องขยายที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ประการที่สาม

คือการชิลด์(Shielding) สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่ทั่วไปอาจเหนี่ยวนำเข้ามาในส่วนที่มีอิมพีแดนซ์สูงได้ง่ายโดยเฉพาะที่คอยล์ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามากทีเดียวหากการชิลด์ไม่ดีพอ วงจรสมบูรณ์ของโพรบแสดงในรูปที่ 3.13

การทำงานของเครื่อง

C1, C2 และ C15 และ เรโซแนนซ์คอยล์จะต่อกับแทปซี(Tapped-C) เพื่อแมทช์อิมพีแดนซ์ระหว่าง 50 โอห์ม และ 2.2 กิโลโอห์ม ในขณะที่มีอาร์เอฟพัลส์เข้ามา D1-D4 จะทำการช็อตที่ความต่างศักย์มากกว่า 1.2 V_{p-p} ทำให้ R1 ต่อแบบขนานกับเรโซแนนซ์คอยล์ จึงประมาณได้ว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรแทงค์(Tank Circuit) จะมีอิมพีแดนซ์ประมาณ R1 ซึ่งเป็นผลให้ค่าคิว(Q) ของระบบต่ำลง ช่วยลดการสะสมพลังงานของวงจรแทงค์หลังสิ้นสุดพัลส์ ช่วยให้เดทไทม์(Dead Time) ของระบบสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อาร์เอฟพัลส์ที่มีกำลังมากกว่าปรกติเนื่องจากการสูญเสียไปกับ R1 หน้าที่อีกอย่างหนึ่งสำหรับ D1-D4 คือป้องกันไม่ให้ความแรงของอาร์เอฟพัลส์ผ่านเข้าไปทำลาย Q1 หลังจากสิ้นสุดพัลส์ D1-D4 จะมีอิมพิแดนซ์สูงมาก ทำให้วงจรแทงค์เป็นอิสระจาก R1 ค่าคิวของระบบจะสูงขึ้น สัญญาณจากการเรโซแนนซ์ที่เหนี่ยวนำในคอยล์จะมีการสูญเสียน้อย Q1 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายที่อินพุทอิมพิแดนซ์สูงโดยคลับปลิง(Coupling)กับวงจรแทงค์ผ่านทาง R1 ซึ่งมีผลต่อสัญญาณน้อยมาก เนื่องจากเป็นภาคขยายหน้าสุด(Front End) Q1 จึงควรเป็นอุปกรณ์ที่มีนอยส์ฟิกเกอร์(Noise Figure)ต่ำที่สุด ที่หามาได้คือ แกลเลี่ยมอาร์เซไนซ์มอสเฟทแบบเกทคู่(Dual Gate GaAs Mosfet) เบอร์ 3SK97 Q2 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สำหรับโหลดความต้านทานต่ำ(50 โอห์ม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



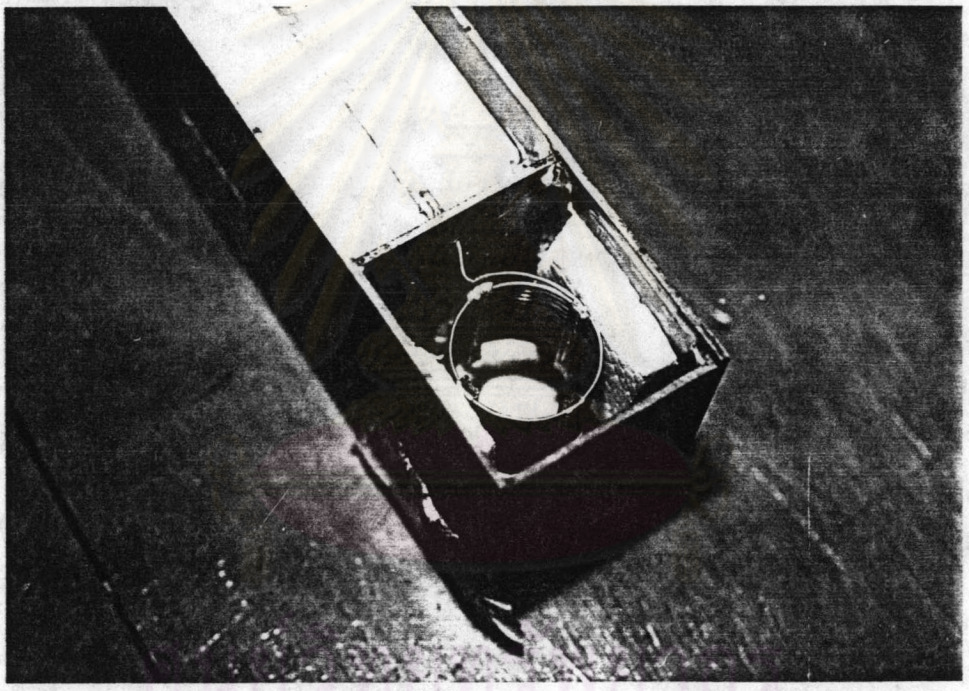
รูปที่ 3.13 วงจรของโพรบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I10305889

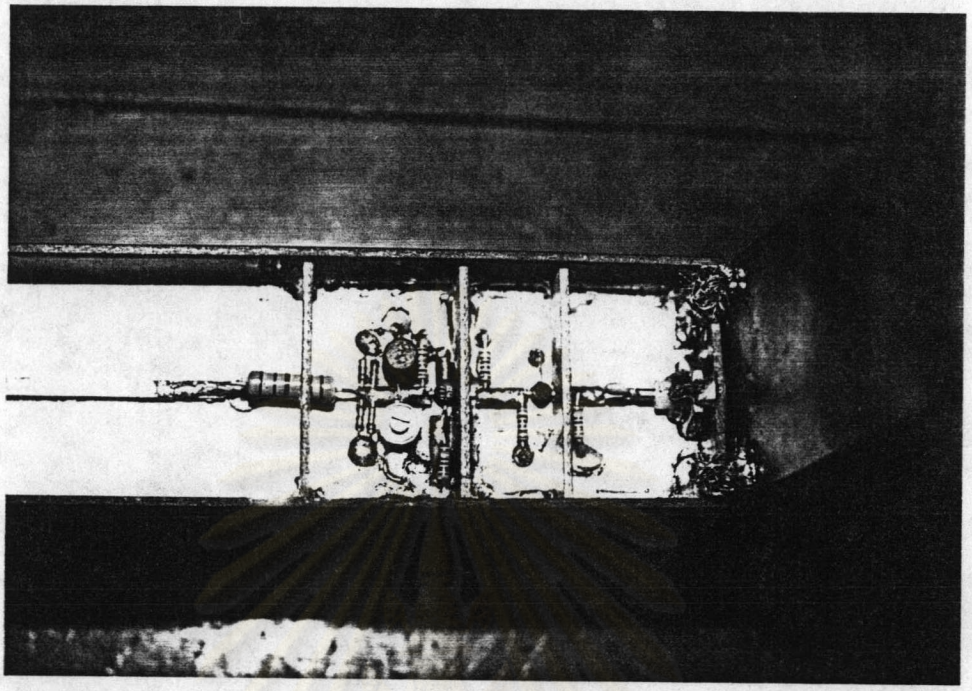
การสร้าง

ตัวโพรบทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ นำมาตัดและประกอบเข้าด้วยกันเป็นกล่องโดยการบัดกรี เนื่องจากเผื่อไว้สำหรับการทดลองการจำลองภาพด้วยหลักการทางเอ็นเอ็มอาร์ จึงใช้คอยล์ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่าปรกติ คือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 cm. สูง 2.1 cm. มีจำนวนรอบ 15 รอบ ติดตั้งในส่วนปลายของโพรบ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

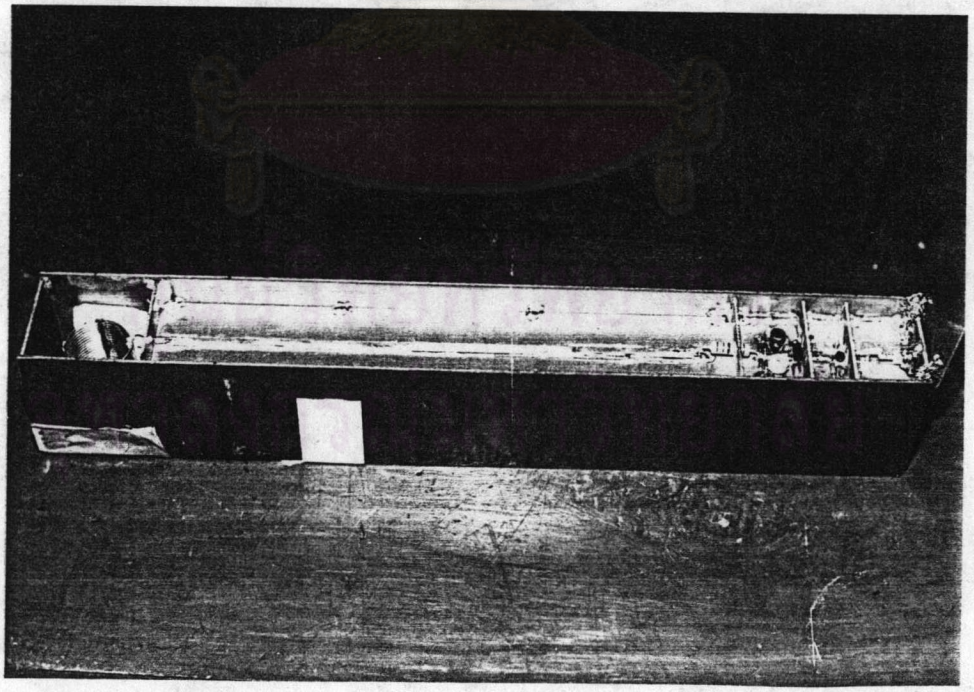


รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งคอยล์ในโพรบ

เนื่องจากขาของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคเป็นสารแม่เหล็ก จึงติดตั้งให้ห่างออกมาจากคอยล์ประมาณ 20 cm. เชื่อมต่อกันด้วยเส้นทองแดงที่ทำจากแผ่นวงจรพิมพ์เส้นเล็กๆ กว้างประมาณ 0.3 cm. ในส่วนของปรีแอมป์ต้องมีการชีลด์อย่างดีระหว่างภาคขยาย แหล่งจ่ายไฟจะส่งกระแสผ่านฟิดทรูขึ้นมาจากข้างล่างของกล่อง แสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงส่วนของปรีแอป์



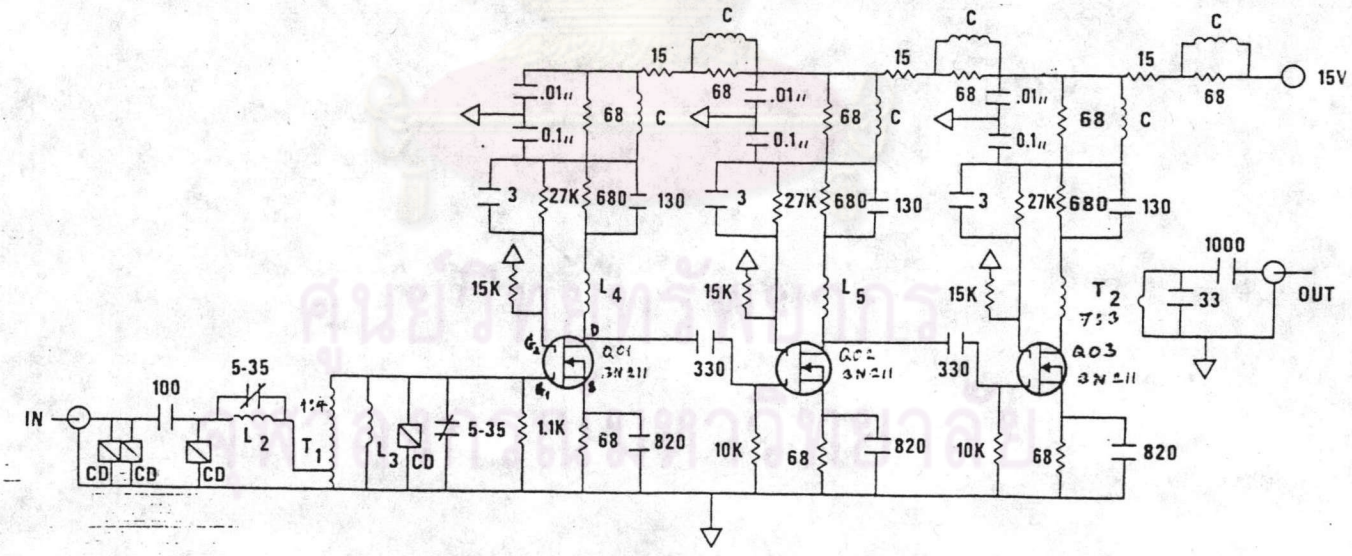
รูปที่ 3.16 แสดงโพรบที่สร้างเสร็จ

การใช้งาน

ก่อนการใช้งานต้องทำการจูน(Tune) โดยป้อนสัญญาณอาร์เอฟความถี่ 10 MHz ที่มีขนาดน้อยๆเข้าทางอินพุท ปรับ C1และC8 จนสัญญาณที่เอาท์พุทของปรีแอมป์มีขนาดใหญ่ที่สุด

3.8 การสร้างเครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟ

สัญญาณที่ออกมาจากโพรบยังมีขนาดเล็กเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปตรวจหาสัญญาณโดยเฟสเซ็นซิทีปดีเทคเตอร์ จึงต้องนำมาผ่านเครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟก่อน รายละเอียดของวงจรอยู่ในเอกสารอ้างอิง [10] ดังแสดงในรูปที่ 3.17



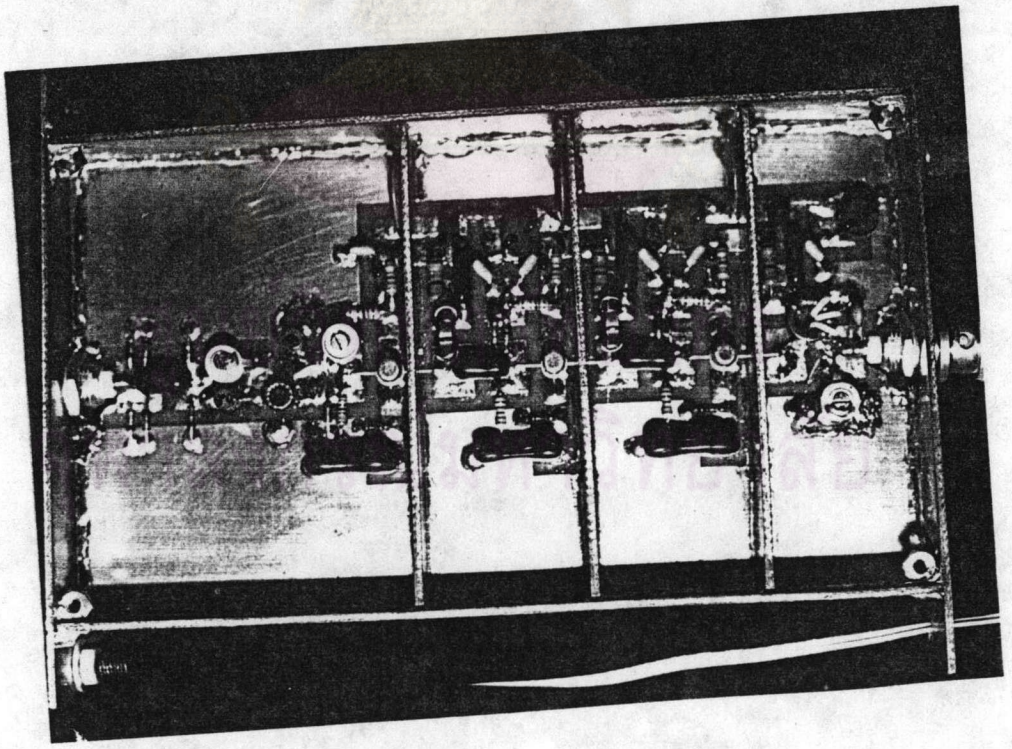
รูปที่ 3.17 แสดงวงจรของเครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟ

การทำงานของเครื่อง

สัญญาณที่อิมพิแดนซ์ 50 โอห์มถูกเปลี่ยนให้เป็น 1 K โอห์มโดย T1 และถูกขยายโดย Q01, Q02 และ Q03 อิมพีแดนซ์จะถูกเปลี่ยนให้เป็น 50 โอห์ม อีกครั้งโดย T2

การสร้าง

อุปกรณ์ถูกออกแบบให้อยู่ในกล่องชีลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก การชีลด์ระหว่างภาคขยายเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการสร้างวงจรอาร์เอฟที่มีอัตราการขยายสูง เป็นการป้องกันการป้อนกลับโดยการเหนี่ยวนำ ทำให้วงจรมีเสถียรภาพสูงไม่เกิดการออสซิลเลท แผ่นวงจรพิมพ์ใช้แบบสองหน้า ด้านล่างใช้เป็นกราวด์เพลน ด้านบนเป็นลายวงดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข. อุปกรณ์จะถูกบัดกรีบนด้านบนของแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากส่วนรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ด้านล่างและป้อนกระแสผ่านฟิดทรูขึ้นมาป้อนให้กับวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงเครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟที่สร้างเสร็จ

พระมงกุฎเกล้า สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้งาน

เครื่องขยายสัญญาณอาร์เอฟที่สร้างมีอัตราการขยายถึง 30 dB เสถียรภาพการทำงานดีมาก มีเดดไทม์(Dead Time) ~ 4 μs

3.9 การสร้างเฟสเซนซิทีปดีเทคเตอร์

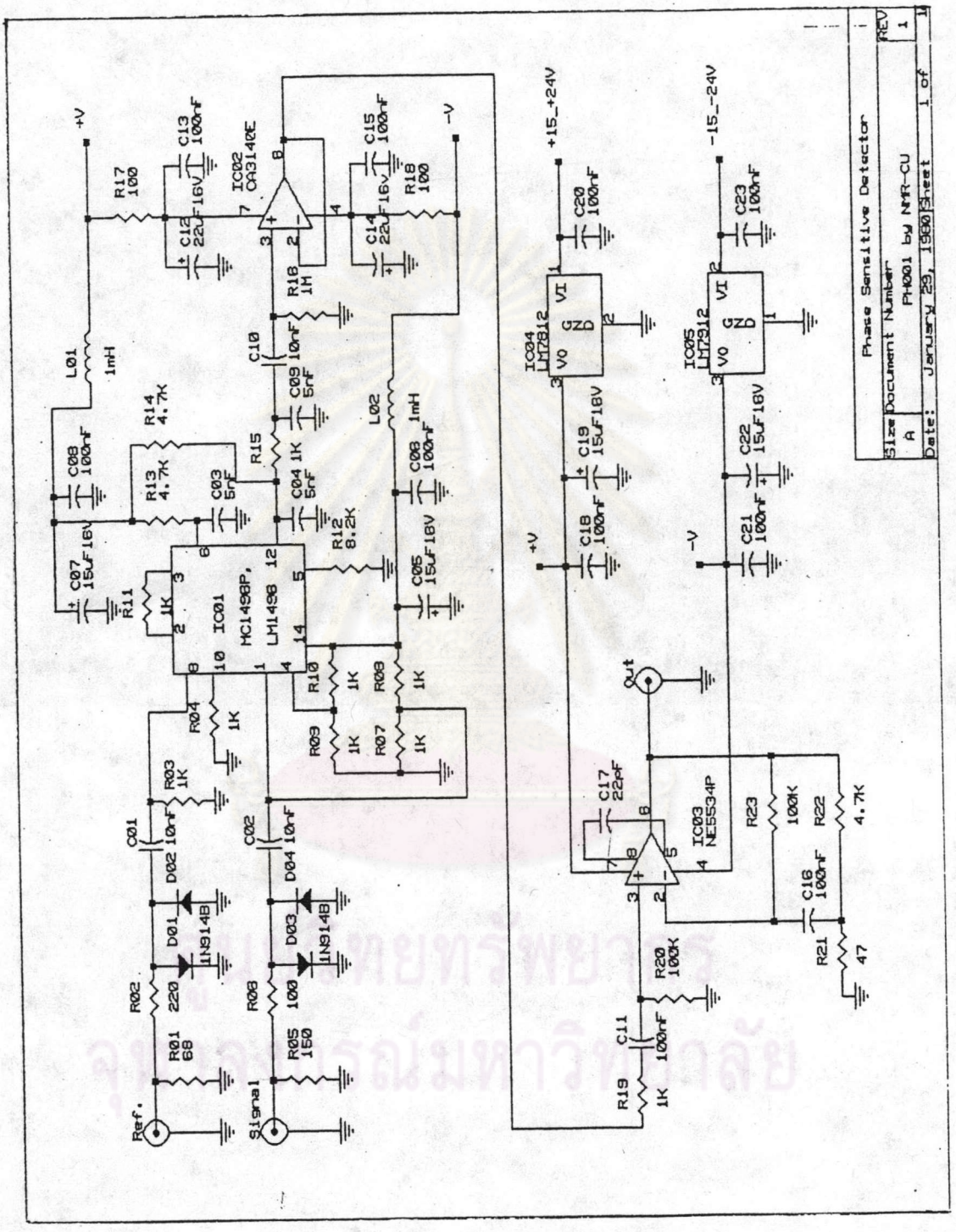
เฟสเซนซิทีปดีเทคเตอร์เป็นส่วนที่ใช้ตรวจหาสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ด้วยวิธีการตัดคลื่นอาร์เอฟออก ทำงานเหมือนกับโปรดักท์ดีเทคเตอร์ที่ใช้สำหรับตัดคลื่นพาในเครื่องรับวิทยุ ซึ่งต้องใช้สัญญาณอ้างอิงอันเดียวกับความถี่ของอาร์เอฟพัลส์ คลื่นอาร์เอฟที่ใช้อ้างอิงจะมีสองเฟสที่ต่างกัน 90 องศา เพื่อตรวจหาสัญญาณแบบ U และ แบบ V วงจรของเครื่องแสดงในรูปที่ 3.19

การทำงานของเครื่อง

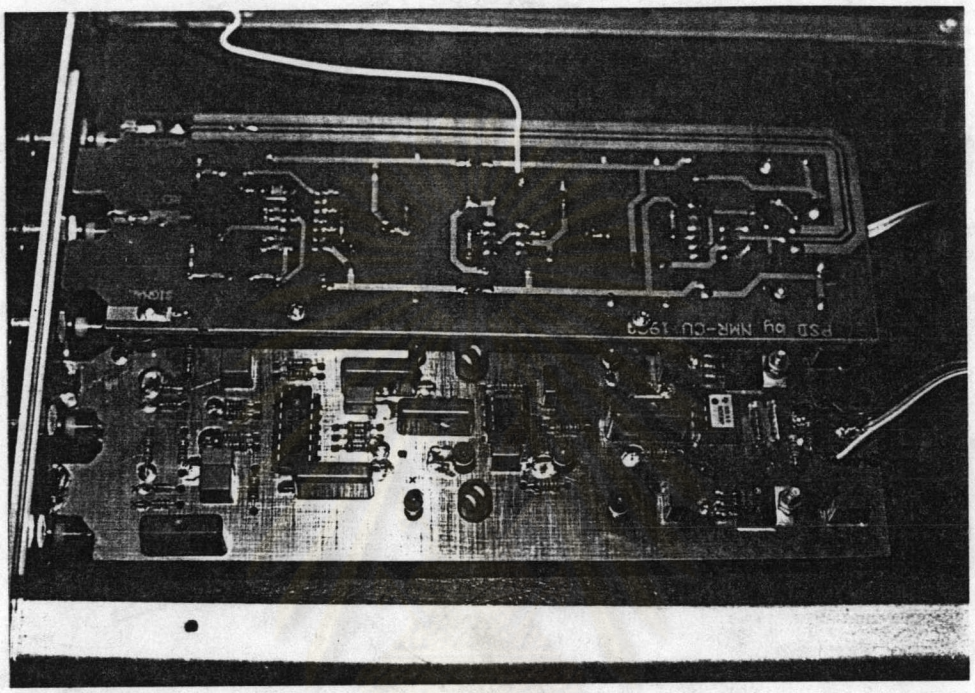
IC01 ทำหน้าที่เป็นดับบลีบาลานซ์โปรดักท์ดีเทคเตอร์(Doubly Balance Product Detector) IC02 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ IC03 เป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยาย 20 dB

การสร้าง

อุปกรณ์จะติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบสองหน้า ด้านบนจะทำหน้าที่เป็นกราวด์เพลน การสร้างต้องสร้างพร้อมกันสองชุด สำหรับใช้กับสัญญาณอ้างอิงสองเฟส ที่อินพุทของสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ควรมีทรานส์ฟอเมอร์แมทชิ่งระหว่าง 50 โอห์มกับอินพุทของเครื่องทั้งสองชุด จึงจะทำให้ไม่มีการสูญเสียสัญญาณโดยเปล่าประโยชน์ เครื่องที่สร้างเสร็จแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 แสดงวงจรของเฟสเซนซิทีฟดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.20 แสดงเฟสเซนซิทีปดีเทคเตอร์ที่สร้างเสร็จ

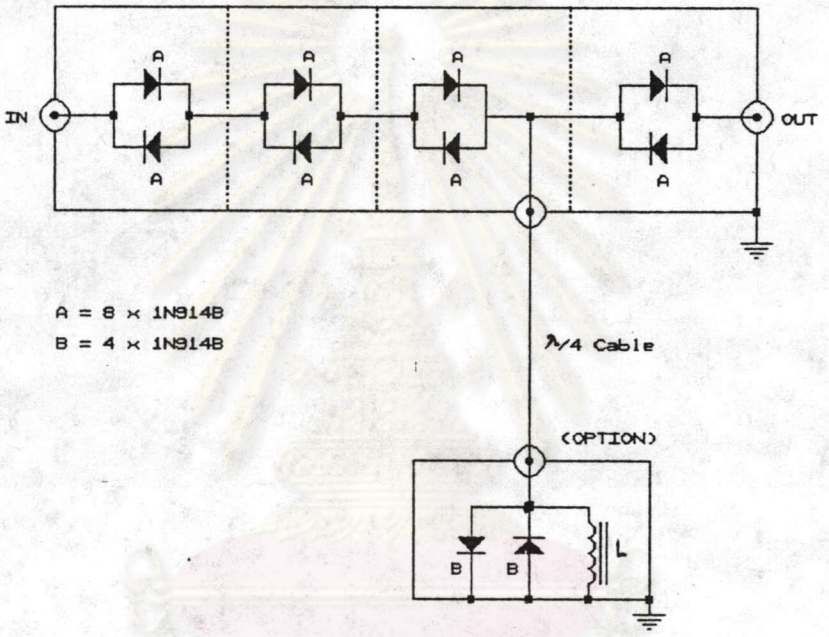
การใช้งาน

เครื่องสามารถตัดสัญญาณของอาร์เอฟออกประมาณ 50 dB เอาท์พุทสามารถสวิงได้มากกว่า 10 V_{p-p}

3.10 การสร้างนอยส์ไอโซเลชั่นสวิทช์(Noise Isolation Switch) [8],[9]

ในขณะสิ้นสุดพัลส์และกำลังวัดสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ แม้จะมีอาร์เอฟสวิทช์คอยปิดกั้นไม่ให้มีสัญญาณอาร์เอฟผ่านเข้าไปในเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ แต่เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ

จะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนออกมาเองได้ หากปล่อยให้ผ่านเข้าไปในโพรบได้ก็จะไปรบกวนระบบทำให้ประสิทธิภาพของสเปกโทรมิเตอร์ลดลงเป็นอย่างมาก วิธีหนึ่งที่อาจแก้ปัญหานี้ได้คือให้เครื่องขยายกำลังอาร์เอฟทำงานในคลาสซี อีกวิธีหนึ่งคือใช้นอยส์ไอโซเลชั่นสวิทช์ หรือใช้ทั้งสองวิธี วงจรของนอยส์ไอโซเลชั่นสวิทช์แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรของนอยส์ไอโซเลชั่นสวิทช์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

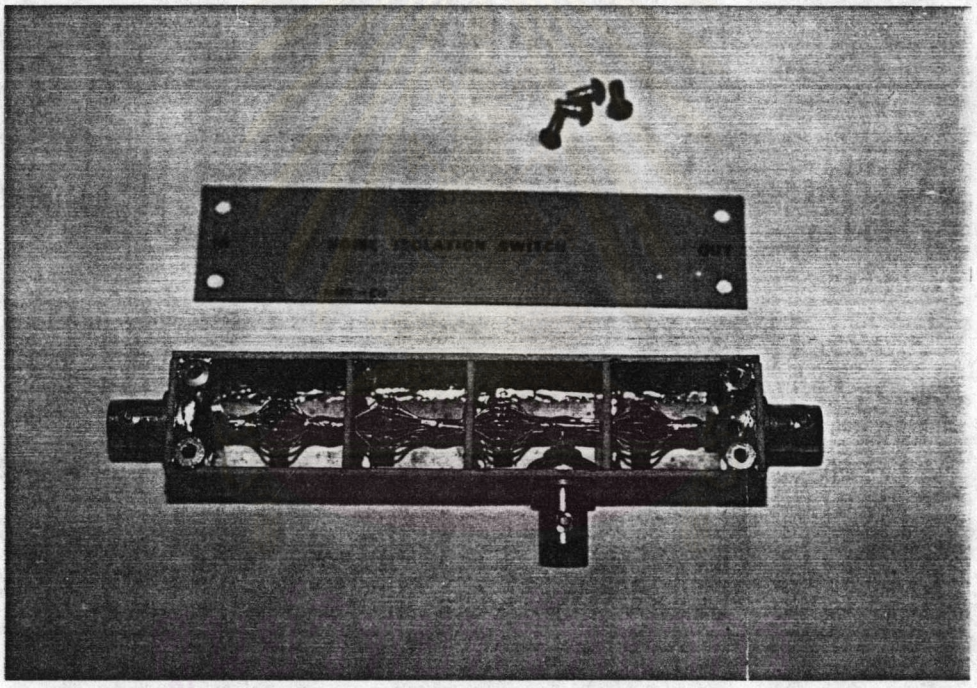
การทำงานของเครื่อง

เครื่องนี้อาศัยสมบัติในทิศฟอร์เวิร์ดไบอัส(Forward Bias)ของสวิทชิ่งไดโอดคือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเมื่อมีความต่างศักย์ตกคร่อมมากกว่า $\simeq$ 0.6 V แต่ที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า $\simeq$ 0.6 V จะเปลี่ยนเป็นอิมพีแดนสูง สำหรับวงจรที่สร้างใช้ไดโอดขนานกันหลายตัวเพื่อ

ให้ผ่านกระแสได้มากขึ้น และอนุกรมกันเพื่อให้ลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น สายนำสัญญาณ $\lambda/4$ และไดโอดที่ต่อลงกราวด์จะช่วยลดองค์ประกอบความถี่ต่ำที่มากับพัลส์ ค่าของตัวเหนี่ยวนำเลือกเพื่อให้เรโซแนนซ์กับค่าความจุในไดโอด

การสร้าง

ในวิทยานิพนธ์นี้สร้างเฉพาะวงจรส่วนบน การชีลด์เป็นชั้นๆจะช่วยให้ลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น เครื่องที่สร้างเสร็จแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงนอยส์ไอโซเลชั่นสวิทช์ที่สร้างเสร็จ

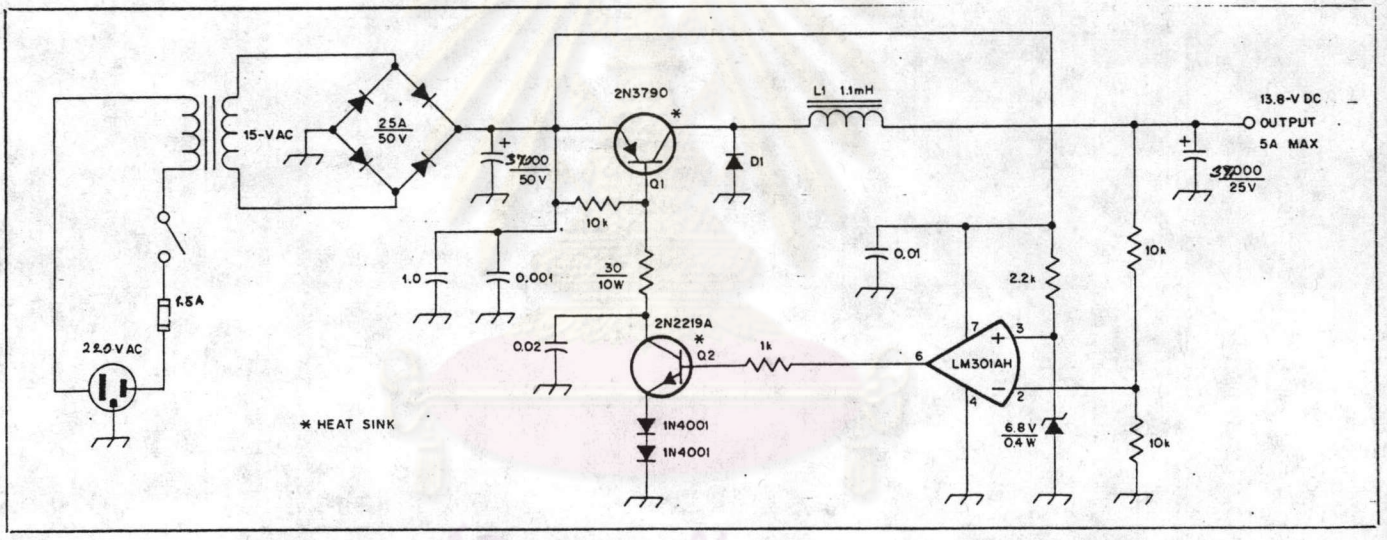
การใช้งาน

เครื่องมือชิ้นนี้จะต่อระหว่างเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟและโพรบ ซึ่งสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ $\sim$ 40 dB

3.11 การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 V 5 A

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเครื่องนี้ใช้กับเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 15 W ใช้วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสวิทชิ่ง รายละเอียดต่างๆอยู่ในเอกสารอ้างอิง [6] วงจรและตัวเครื่องแสดงในรูปที่ 2.23 และ 2.24 ลายวงจรพิมพ์และตำแหน่งอุปกรณ์อยู่ในภาคผนวก ข.



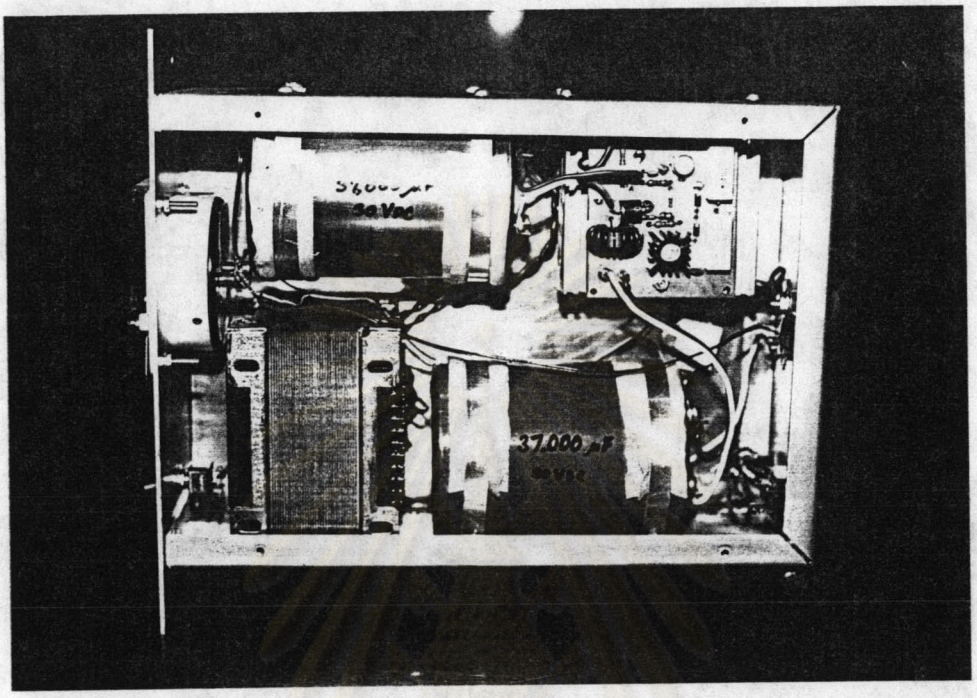
— A switching power supply suitable for use with medium-power amateur transceivers. At full load the switching rate is approximately 50 kHz. Resistance values are in ohms, and capacitance values are in microfarads.

D1 — 6 A, 600 PIV, anode common to case, ECG 5863 or equiv.

L1 — 33 turns no. 14 enam. on Amidon FT 240-43 toroidal core.

Q1 Heat sink — 4 × 3 inches with ½-inch fins extruded from flat surfaces.
Q2 Heat sink — TO-5 clip-on unit.

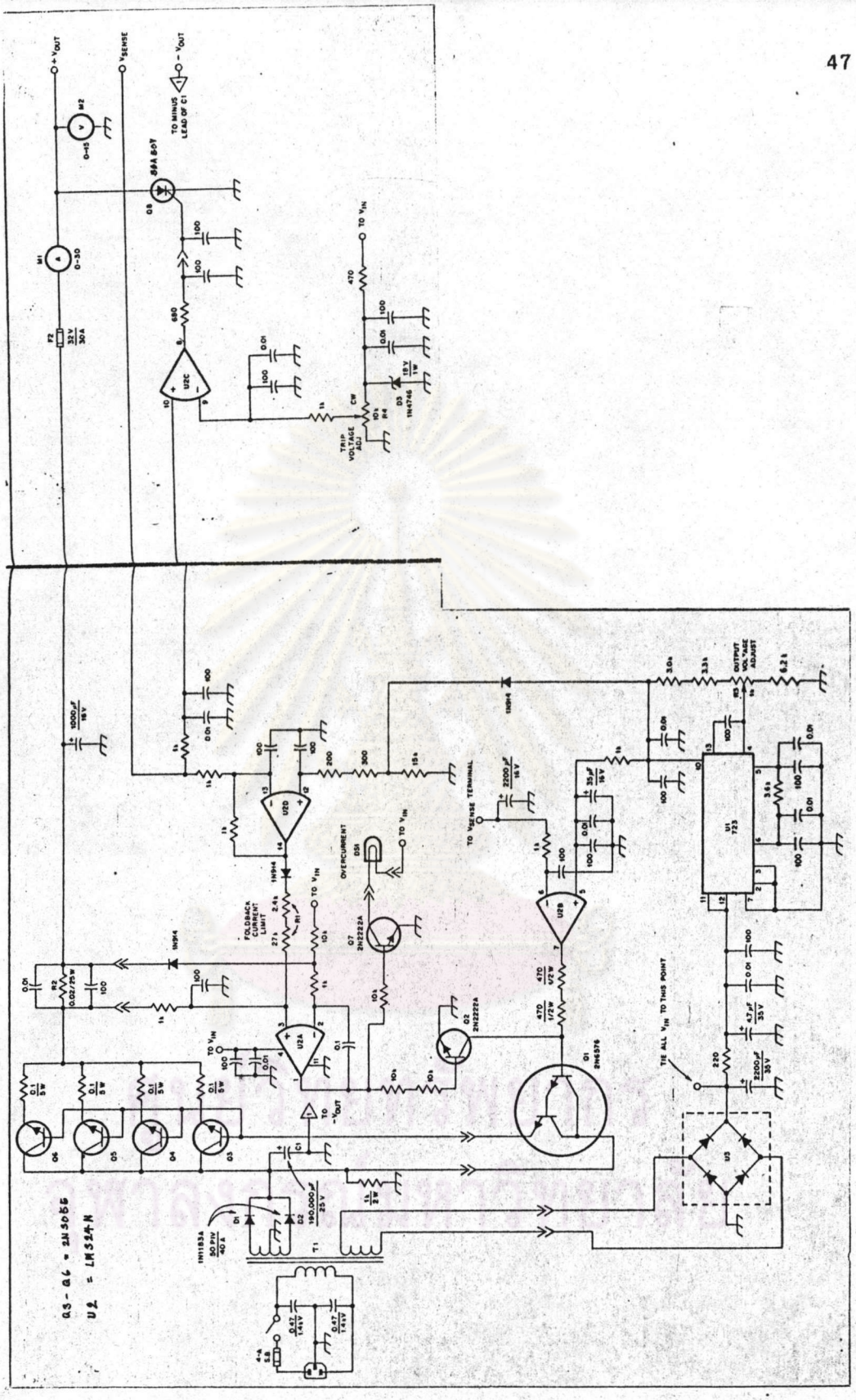
รูปที่ 2.23 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 V 5 A



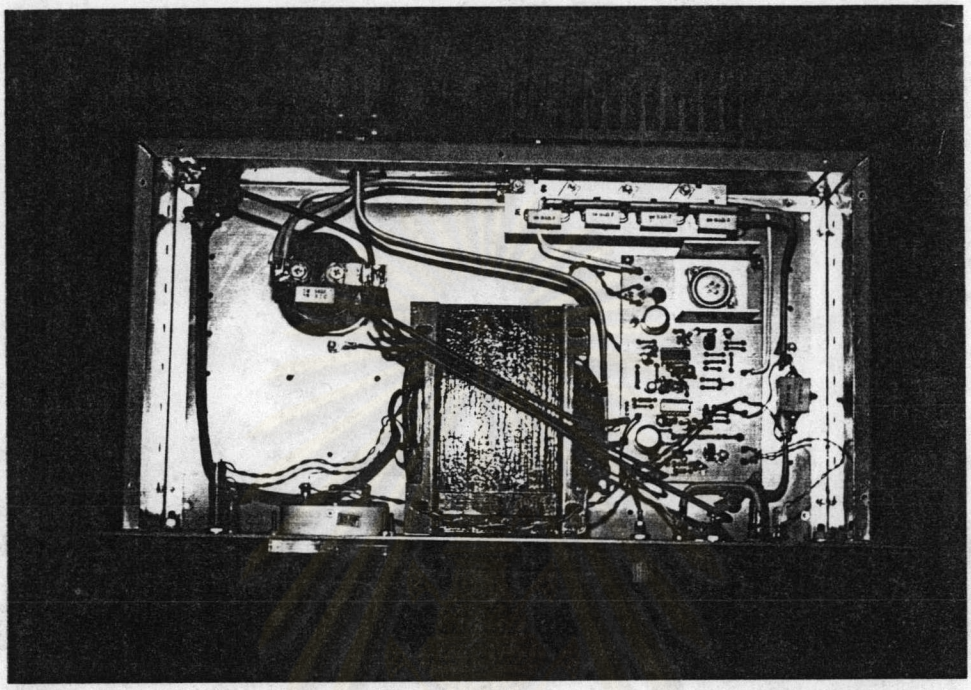
รูปที่ 3.24 แสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 5 A ที่สร้างเสร็จ

<u>แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 V 25 A</u>

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเครื่องนี้ใช้กับเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟ 140 W ใช้วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบเชิงเส้น รายละเอียดต่างๆอยู่ในเอกสารอ้างอิง [6] วงจรและตัวเครื่องแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.26 ลายวงจรพิมพ์และตำแหน่งอุปกรณ์อยู่ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 2.25 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 V 25 A



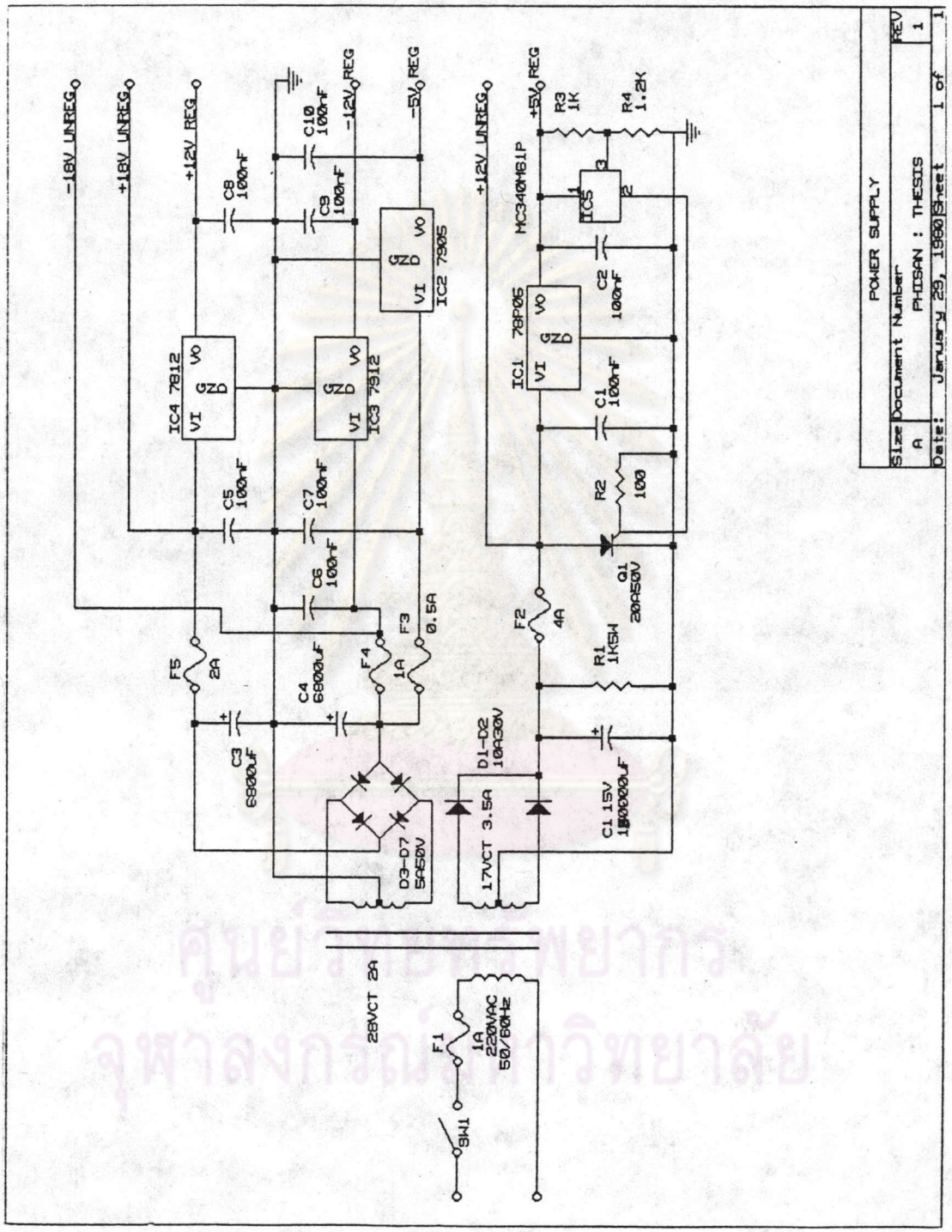
รูปที่ 3.26 แสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 13.8 V 25 A ที่สร้างเสร็จ

<u>แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ</u>

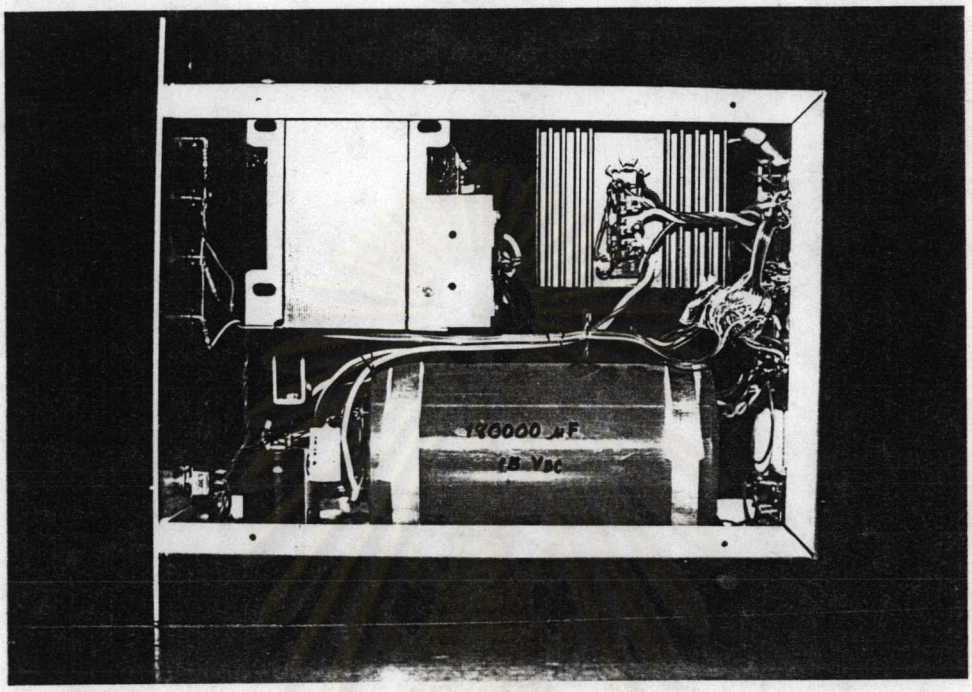
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเครื่องนี้ออกแบบให้มีสองชุดคือ

- ชุดมีวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามี +12 V, +5 V, -5 V, -12 V
- ชุดไม่มีวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามี +18 V, +12 V, -18 V

วงจรและตัวเครื่องแสดงในรูปที่ 3.27 และ 3.28



รูปที่ 3.27 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

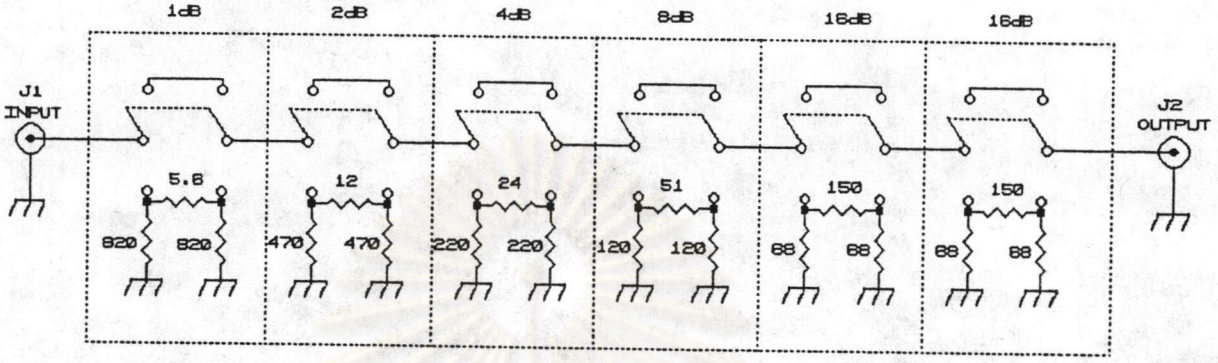


รูปที่ 2.28 แสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สร้างเสร็จ

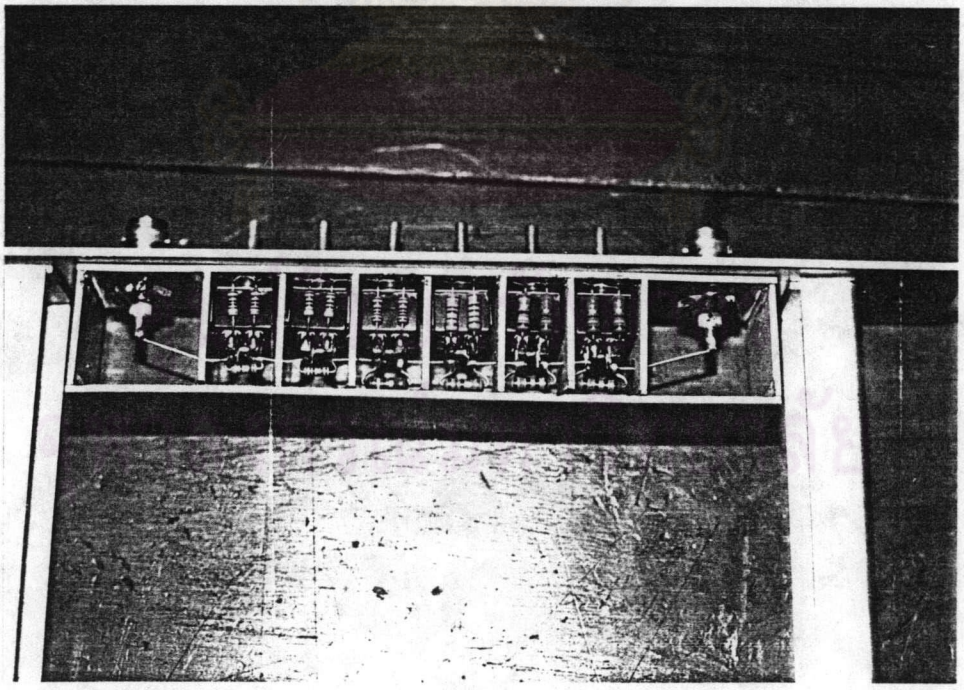
3.12 การสร้างอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ

ตัวลดสัญญาณ(Attenuator) [6]

ตัวลดสัญญาณจะถูกใช้เพื่อปรับขนาดของสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดคลื่นหลายเฟส 10 MHz เพื่อให้มีความเหมาะสมกับเครื่องขยายกำลังอาร์เอฟและเฟสเซ็นซิทีฟดีเทคเตอร์ วงจรและตัวเครื่องแสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30



รูปที่ 2.29 แสดงวงจรตัวลดสัญญาณ



รูปที่ 2.30 แสดงตัวลดสัญญาณที่สร้างเสร็จ

ดัมมีโหลด(Dummy Load)

ดัมมีโหลดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป็นโหลดมาตรฐานที่มีอิมพีแดนซ์เป็นค่าจริงเพียงอย่างเดียวเพื่อการทดสอบและปรับเทียบอุปกรณ์ทางอาร์เอฟ ดัมมีโหลดที่สร้างขึ้นมีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ทนกำลังขนาดขนาด 0.5 W, 12 W, 350 W สร้างจากการนำเอาตัวต้านทานหลายๆ ตัวมาขนานกันเพื่อให้ทนกำลังได้สูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย