

เรดาร์กระป๋องเพื่อการศึกษาและการประยุกต์ใช้งาน
CAN RADAR FOR EDUCATION AND ITS APPLICATIONS



โดย

นางสาว ธารทิพย์ หนูดำ

นางสาว นพวรรณ ครัววงษ์

นางสาว นกัสนร อินทรสกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เรดาร์กระป๋องเพื่อการศึกษาและการประยุกต์ใช้งาน
CAN RADAR FOR EDUCATION AND ITS APPLICATIONS

โดย

นางสาว ธารทิพย์	หนูดำ	58010583
นางสาว นพวรรณ	ครุวงษ์	58010633
นางสาว นภััสสร	อินทรสกุล	58010643

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.อัศรพล ตีร์รัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(*อัศรพล ตีร์รัตน์*)

อาจารย์ที่ปรึกษา

19 / 1 / 62

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering

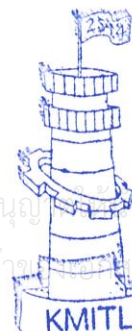
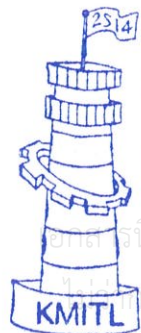
ผ่านการตรวจฉันทราบแล้ว

(*พท.ไพฑูริย์*)

กรรมการผู้ตรวจงาน

19 / 1 / 62

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering



ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เรดาร์กระป๋องเพื่อการศึกษาและการประยุกต์ใช้งาน

CAN RADAR FOR EDUCATION AND ITS APPLICATIONS

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------------------|----------|
| 1. นางสาว ธารทิพย์ หนูดำ | 58010583 |
| 2. นางสาว นพวรรณ ครุวงษ์ | 58010633 |
| 3. นางสาว นภัสสร อินทรสกุล | 58010643 |

อัครพล ตรีรัตน์

(ผศ.อัครพล ตรีรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการลุล่วงได้ ด้วยการสนับสนุนที่ดีจากหลายฝ่าย ทั้งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อัครพล ตรีรัตน์ และ ผศ.ดร.ศรวรัตน์ ชิวปรีชา ซึ่งได้สนับสนุนทั้งการให้คำแนะนำ เสนอแนวทางแก้ปัญหา สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็น รวมทั้งติดตามความก้าวหน้าของปริญญาานิพนธ์นี้อย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาโทรคมนาคมทั้ง รศ.ดร.ชวงค์ พงษ์เจริญพานิช และ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่สนับสนุนการให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงาน รวมไปถึง รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน และ ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมถึงขอขอบคุณที่เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม คุณสนธิ เตียวฉิม และ คุณณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการโทรคมนาคมที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงาน และรวมถึงพี่ปริญญาโท คุณกษิมาวิษย์ สุทธิกาญจน์ และพี่ปริญญาเอก คุณอานนท์ สกลคณาพงษ์ ที่คอยให้คำแนะนำและคอยตอบข้อสงสัยให้เสมอ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ ที่ช่วยให้การจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธารทิพย์ หนูดำ
 นพวรรณ ครุวงษ์
 นภััสสร อินทรสกุล
 ผู้จัดทำ

เรดาร์กระป๋องเพื่อการศึกษาและการประยุกต์ใช้งาน
CAN RADAR FOR EDUCATION AND ITS APPLICATIONS

โดย นางสาว ธารทิพย์ หนูดำ 58010583
นางสาว นพวรรณ ครุวงษ์ 58010633
นางสาว นกัสนร์ อินทรสกุล 58010643

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อัครพล ตีร์รัตน์

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ในด้านการศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องหลักการพื้นฐานของระบบเรดาร์ โดยศึกษาหลักการพื้นฐานของระบบเรดาร์โดยเจาะ Continuous Wave Radar ทั้งนี้รวมถึง FMCW Radar และการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ โดยสร้างต้นแบบฮาร์ดแวร์ของระบบเรดาร์ประกอบไปด้วยส่วนสายอากาศ Waveguide จากกระป๋อง วงจรภาคกำเนิดสัญญาณ วงจรภาค RF วงจรภาค baseband และวงจร FM Modulation ทั้งนี้ต้นแบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นจะทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz โดยสัญญาณที่ออกจากสายอากาศฝั่งส่งจะเป็น Chirp (Sweep) Signal ซึ่งจะถูกลดคูลด์เป็นสัญญาณ FM ผ่าน VCO เมื่อสัญญาณที่ถูกส่งไปกระทบกับเป้าหมายสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะเข้ามาที่สายอากาศฝั่งรับผ่านวงจรภาค RF และแปลงกลับเป็นสัญญาณ baseband ซึ่งจะถูกรับเข้าที่คอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลผ่านทาง sound card โดยบันทึกเป็นไฟล์ .wave และประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อประมวลผลสัญญาณเรดาร์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจจับความเร็วโดยอาศัยปรากฏการณ์ Doppler และการตรวจจذبระยะทาง โดยจะแสดงผลของสัญญาณเรดาร์ที่หน้าจอของโปรแกรม ทั้งต้นแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาทั้งหมดเป็นการทดลองสร้างต้นแบบระบบเรดาร์ โดยผลการดำเนินการทั้งหมดจะถูกนำเสนอในรูปแบบชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้ ที่พร้อมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับระบบเรดาร์ รวมถึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบเรดาร์ นอกเหนือจากวัตถุประสงค์ที่กล่าวไป

ABSTRACT

This project aims to provide basic principles and theory of RADAR system. We focus on studying the basic principles of radar systems, especially Continuous Wave Radar, FMCW Radar and Radar Signal Processing. The hardware prototype of the radar system consists of waveguide antennas, function generator circuit, RF circuit, baseband circuit and the FM modulation circuit. The prototype will operate at center frequency 2.4 GHz. The transmitted signal is a Chirp (Sweep) Signal, which is modulated into FM signal through VCO. When the transmitted signal that is reflected from the target is scattered back and then received by the received antenna. The received signal then go through an RF mixer which has a copy of the transmitted signal. The RF signal is then converted into IF signal. After passing through Low Pass Filter in the video amplifier, we are left with a baseband signal which is then converted to a digital signal through a sound card in the computer that is connected to the circuit via audio cord. The output signal is recorded and saved as a wave file before being processed by MATLAB, which is used for radar signal processing. The main purpose of this system is to detect velocity and range based on Doppler phenomena. The result will be displayed via MATLAB, while both the prototype of the hardware and software are all experimental prototype radar system. All results will be presented in the form of education kit for studying radar system. Further application of the system are to be discussed in the future.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1	บทนำ
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1.2 วัตถุประสงค์
	1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง
	2.1 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)
	2.2 บีต (Beats)
	2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์ (Radar)
	2.3.1 ประเภทของเรดาร์
	2.3.2 การจำแนกชนิดของเรดาร์
	2.3.3 ย่านความถี่ของเรดาร์
	2.4 เรดาร์คลื่นต่อเนื่อง
	2.4.1 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องกับวัตถุหยุดนิ่ง
	2.4.2 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องกับวัตถุเคลื่อนที่
	2.4.3 สถาปัตยกรรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง
	2.5 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่
	2.5.1 การประมวลผลสัญญาณของคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่
	2.5.2 สถาปัตยกรรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่
	2.6 ทฤษฎีสายอากาศการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 2	2.6.1 รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation)	29
	2.6.2 Near Field และ Far Field	29
	2.6.3 โพลาริเซชัน (Polarization)	29
	2.6.4 พารามิเตอร์ที่ใช้	30
	2.6.5 การส่งผ่าน (Transmission Lines)	30
	2.6.6 Scattering Parameters	31
	2.6.7 คุณลักษณะของสายอากาศ	33
	2.6.8 Friis Transmission Equation	36
	2.6.9 Power Density และ อัตราการขยายของสายอากาศแบบ Isotropic และ Directional	36
	2.6.10 อัตราการขยาย หรือ Gain	37
	2.6.11 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) และ VSWR	39
	2.6.12 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	40
	2.6.13 ท่อนำคลื่นทรงกลม (Circular Waveguide)	41
	2.7 ทฤษฎีวงจรรกานเนตสัญญาณและวิดีโอ Amplifier	42
2.7.1 วงจรรกานเนตสัญญาณสามเหลี่ยม	42	
2.7.2 วงจร Video Amplifier	43	
บทที่ 3	การออกแบบและการจัดทำปริญญาบัตร	
	3.1 การสร้างระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์	53
	3.1.1 การออกแบบสายอากาศฝั่งรับและส่ง	54
	3.1.2 การออกแบบวงจรรกานเนตสัญญาณสามเหลี่ยมและ Video Amplifier	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
3.1.3 การประมวลสัญญาณเรดาร์	61
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	70
3.2.1 ภาค Radar RF	70
3.2.2 ภาคสายอากาศ	70
3.2.3 วงจรภาค Baseband	71
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	71
3.3.1 การจัดเก็บการทดสอบส่วนฮาร์ดแวร์	71
3.3.2 การจัดเก็บผลการทดลองของทั้งระบบเรดาร์	80
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองสายอากาศ	83
4.1.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	83
4.1.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ	86
4.1.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	87
4.2 ผลการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier	90
4.2.1 ผลการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	90
4.2.2 ผลการทดลองวงจร Video Amplifier	91
4.2.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ voltage controlled oscillator	93
4.2.4 การทดสอบอุปกรณ์ Frequency mixer (mixer)	95
4.3 ผลของการทดลองระบบเรดาร์	96
4.3.1 ผลการทดลองตรวจจับความเร็วของเป้าหมายด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง	96
4.3.2 ผลการทดลองตรวจจับระยะทางของเป้าหมายด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่	104
	100
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	109
5.1.1 ส่วนการออกแบบต้นแบบระบบเรดาร์	109

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5	
5.1.2 ส่วนการประมวลผลสัญญาณเรดาร์	109
5.1.3 ส่วนการทดสอบระบบเรดาร์	110
5.1.4 ส่วนชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้	110
5.2 ข้อเสนอแนะ	111
บรรณานุกรม	112
ภาคผนวก ก ส่วนประมวลผลสัญญาณ	114
ภาคผนวก ข เอกสารประกอบการทดลอง	119
ภาคผนวก ค Data Sheet	147



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	2
2.1	3
2.2	5
2.3	7
2.4	8
2.5	11
2.6	12
2.7	14
2.8	15
2.9	16
2.10	17
2.11	17
2.12	19
2.13	21
2.14	22
2.15	25
2.16	25
2.17	27
2.18	27
2.19	29
2.20	31
2.21	32
2.22	32
2.23	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.24	สายอากาศปากแตรไมโครเวฟ 10 GHz	33
2.25	รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบสามมิติ	34
2.26	รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบสองมิติในระนาบ YZ	34
2.27	รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบสองมิติในระนาบ XZ	35
2.28	อัตราการขยายและความหนาแน่นพลังงานของสายอากาศ	37
2.29	การทดสอบค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่เหมือนกันทุกประการ	39
2.30	ทิศทางของสัญญาณตกกระทบและสัญญาณสะท้อนระหว่างการส่งผ่านและสายอากาศ	40
2.31	โครงสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	43
2.32	โครงสร้างวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	44
2.33	โครงสร้างวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่มี AC Coupling	45
2.34	โครงสร้างวงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key ที่อัตราการขยายไฟตรง $H = K$	46
2.35	วงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ที่ใช้โครงสร้างวงจรแบบ SALLEN-KEY ชนิดที่การแบ่งแรงดันเพื่อควบคุมอัตราการขยายไฟตรง ได้ตามกำหนด	48
2.36	วงจร Sallen-Key ลำดับที่ 1	50
2.37	วงจร Sallen-Key ลำดับ 2 และ 3	51
3.1	หลักการทํางานในระบบฮาร์ดแวร์	53
3.2	ท่อนำคลื่นทรงกลมและระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง D	54
3.3	กระป๋องอคูมิเนียมและระยะจากกันกระป๋องเพื่อใส่โพรบ	55
3.4	โครงสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	56
3.5	คาแรงดันที่จ่ายให้ VCO ให้เกิดความถี่ต่าง	56
3.6	Non-Inverting Amplifier	57
3.7	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	58
3.8	แผนผังของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier	59
3.9	ลายแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.10	วงจรถ่ายสัญญาณและ video amplifier	60
3.11	การบันทึกสัญญาณเสียงของโปรแกรม Audacity	61
3.12	ผังงานหลักการทางานในโหมดความถี่ต่อเนื่อง	63
3.13	โค้ดส่วนการอ่านสัญญาณและตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบ	64
3.14	โค้ดส่วนการ Invert สร้างค่าเวลาและลบกระแสไฟตรง	64
3.15	โค้ดส่วนคำนวณและแสดงผลในโหมดความถี่ต่อเนื่อง	65
3.16	ผังงานหลักการทางานในโหมดความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่	66
3.17	โค้ดแสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของโหมดความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่	67
3.18	โค้ดแสดงการคำนวณความละเอียดของช่วงระยะและการ Invert ข้อมูล	67
3.19	โค้ดการกำหนดค่าเวลาโดยเทียบกับสัญญาณพัลส์	68
3.20	กราฟแสดงสัญญาณวิดีโอ (สีแดง) ร่วมกับสัญญาณพัลส์ (สีน้ำเงิน) จากวงจรถ่ายสัญญาณซึ่งถูกเก็บในชุดข้อมูลอินพุตเดียวกัน โดยจะเก็บข้อมูลของสัญญาณวิดีโอทีละ 20 ms โดยการเขียนคำสั่งเพื่อให้หาค่าขอบของสัญญาณพัลส์	68
3.21	โค้ดการพล็อตกราฟ RTI	69
3.22	โค้ดแสดงการพล็อต RTI แบบมีการกำจัด Clutter	69
3.23	เครื่อง Network Analyzer ที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ	72
3.24	การวัด Power coupling ของสายอากาศคู่เหมือน	72
3.25	การตั้งสายอากาศในห้องไร้การสะท้อนเพื่อวัด Power Coupling	73
3.26	การจำลองตั้งสายอากาศในห้องไร้การสะท้อนเพื่อวัด Power Coupling	73
3.27	Spherical Coordinate	74
3.28	การทดสอบ Radiation Pattern ของระนาบ YZ	75
3.29	การทดสอบ Radiation Pattern ของระนาบ XZ	75
3.30	บล็อกไดอะแกรมของ XR-2206	76
3.31	ทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณสามเหลี่ยม	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.32	จำลองทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	77
3.33	LM324	77
3.34	ทดสอบวัดอัตราขยายและความถี่ต่ำผ่าน	78
3.35	อุปกรณ์ VCO	78
3.36	การทดสอบ VCO	79
3.37	อุปกรณ์ Mixer	79
3.38	การทดสอบ Mixer	80
3.39	สวิตช์โหมดความถี่ต่อเนื่องสามารถสังเกตได้จากการเลื่อนสวิตช์ไปฝั่งสัญลักษณ์เส้นตรง	80
3.40	การบันทึกผลจากระบบเรดาร์	81
3.41	การจำลองการบันทึกผลจากระบบเรดาร์	81
3.42	สวิตช์โหมดความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่สามารถสังเกตได้จากการเลื่อนสวิตช์ไปฝั่งสัญลักษณ์สามเหลี่ยม	82
4.1	ค่าพารามิเตอร์ S11 หรือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ทดสอบได้ของสายอากาศฝั่งส่ง	83
4.2	ค่าพารามิเตอร์ S11 หรือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ทดสอบได้ของสายอากาศฝั่งรับ	84
4.3	กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งส่ง ในช่วงความถี่ 2 - 3 GHz	84
4.4	กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งรับ ในช่วงความถี่ 2 - 3 GHz	85
4.5	กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศฝั่งส่ง ในช่วงความถี่ 1 - 3 GHz	85
4.6	กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศฝั่งรับ ในช่วงความถี่ 1 - 3 GHz	86
4.7	ค่า Power Coupling ที่ทดสอบได้	86
4.8	กราฟแสดงอัตราขยายของสายอากาศคู่เหมือนในช่วงความถี่ 2.2 - 2.6 GHz	87
4.9	การวางโมโนโพลในระนาบระนาบ XZ	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 การวางโมโนโพลในระนาบระนาบ YZ	88
4.11 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XZ	89
4.12 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ YZ	89
4.13 ชื่อขาของ XR - 2206	90
4.14 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจร Function Generator	91
4.15 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	92
4.16 ผลการทดลองอัตราการขยายของวงจรขยาย	92
4.17 Frequency Response ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	93
4.18 กราฟแสดงค่าความถี่อดมคติและค่าจากการทดลองของ VCO	93
4.19 สเปกตรัมแสดงแบนด์วิธของสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณแรงดัน 0 – 5 โวลต์ เข้า VCO	94
4.20 สเปกตรัมแสดงแบนด์วิธของสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณแรงดัน 1 – 3.5 โวลต์ เข้า VCO	95
4.21 แสดงสเปกตรัมผลการทดลอง frequency mixer โดยจุด M2 และ M4 คือสัญญาณอินพุตจุด M1 คือส่วนต่างของสองสัญญาณอินพุต และจุด M3 คือส่วนรวมของสัญญาณอินพุต	96
4.22 การทดลองความเร็วโดยให้รถยนต์ขับผ่านหน้าระบบเรดาร์	97
4.23 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของเป้าหมายซึ่งรถจักรยานยนต์ไปกลับ	97
4.24 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของรถยนต์บนถนน	98
4.25 ค่าความเร็วของรถยนต์ขณะวิ่งผ่านเรดาร์	99
4.26 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของรถยนต์ที่วิ่งผ่านเรดาร์	99
4.27 การทดลองระยะทางโดยใช้คนถือแผ่นบอร์ดหุ้มด้วยกระดาษฟรอยด์ อลูมิเนียมหันหน้าเข้าตัวเรดาร์	105
4.28 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 1 เมตรจากเรดาร์	105
4.29 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 2 เมตรจากเรดาร์	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ผลการทดลองตรวจจี้ระยะ 3 เมตรจากเรดาร์	106
4.31 ผลการทดลองตรวจจี้ระยะ 4 เมตรจากเรดาร์	106
4.32 ผลการทดลองตรวจจี้ระยะ 5 เมตรจากเรดาร์	107
4.33 ผลการทดลองตรวจจี้ระยะ 6 เมตรจากเรดาร์	108
4.34 กราฟแสดงค่าความถี่ของระยะทางจากเรดาร์	108



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความถี่ของเรดาร์กับการใช้งานต่างๆ	10
2.2	สมการค่าคงที่จุดตัดเฟสสำหรับโหมดท่อนำคลื่นทรงกลม	41
2.3	ค่า Bessel Functions และ Bessel Derivatives	42
3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาค Radar RF	70
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาคสายอากาศ	70
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาค Baseband	71
4.1	ผลการทดลองวัดความเร็วด้วยรถยนต์ที่ความเร็วต่างๆ	101



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้การศึกษาจากห้องเรียนเพียงอย่างเดียวมันยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผู้ที่ศึกษา มีความรู้ความเข้าใจเนื้อหาวิชาที่เรียนไปและเห็นภาพได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเรียนในภาควิชา วิศวกรรมสื่อสารโทรคมนาคมที่มีการเรียนเกี่ยวกับการสื่อสาร สัญญาณ การส่ง การรับข้อมูล การ วิเคราะห์สัญญาณต่างๆ ซึ่งอาจจะเห็นภาพได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการฝึกฝนหรือฝึกภาคปฏิบัติ เพื่อให้สามารถเข้าใจองค์ความรู้ที่เรียนมาได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้า อย่างมาก ความรู้ที่เราสามารถหาได้จึงไม่ได้มีเพียงแต่ในห้องเรียนหรือในห้องสมุด แต่ยังสามารถหา ได้จาก เว็บไซต์ต่างๆ จากแหล่งความรู้ที่มีความน่าเชื่อถืออย่างเช่น เว็บไซต์ Open Course Ware (OCW) ซึ่งเป็นโครงการ E-Learning ที่จัดทำขึ้นโดย MIT (Massachusetts Institute of Technology) หนึ่งในสถาบันการศึกษาชั้นนำของโลก โดย MIT ได้รวบรวมเอาเนื้อหาวิชาที่มีการเรียนการสอนมาใส่ ไว้ในเว็บไซต์เพื่อเปิดให้คนทั่วไปได้เข้าหาความรู้ทั้งนี้รวมไปถึงองค์ความรู้เรื่องเรดาร์ด้วย ปรินซิเพิลนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาทดลองสร้างต้นแบบฮาร์ดแวร์ของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง (CW Radar) และระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ (FMCW Radar) ที่ได้ศึกษามาจาก Open Course Ware นี้ด้วย เพื่อประโยชน์ในด้านการศึกษาโดยจะนำองค์ความรู้ที่เรียนในด้าน วิศวกรรมสื่อสารโทรคมนาคมมาประยุกต์เพื่อพัฒนาต้นแบบของระบบเรดาร์ อันได้แก่องค์ความรู้ด้าน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศ วิศวกรรมไมโครเวฟ RF circuits baseband circuits ที่เป็นวงจร อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานสำหรับการแปลงและเชื่อมต่อสัญญาณที่ตรวจจับได้ รวมถึงองค์ความรู้ด้านการ ประมวลผลสัญญาณ วัตถุประสงค์ในการเรียนรู้ระบบเรดาร์ดังกล่าวคือ การตรวจจับความเร็ว (Velocity) โดยอาศัยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler phenomenon) และการตรวจจับ ระยะทาง (Range Detection) โดยในการประมวลผลทั้งหมดจะถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นซอฟต์แวร์ที่ทำ การประมวลผลสัญญาณตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ตามที่กล่าวมา ผลการศึกษาและดำเนินงานทั้งหมด ตามที่กล่าวมาจะถูกนำเสนอในรูปแบบชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้ (Education Kits) ที่พร้อมใช้ในการศึกษา เกี่ยวกับระบบเรดาร์ รวมทั้งยังจะนำเสนอแนวทางการนำต้นแบบระบบไปประยุกต์ใช้งานและ พัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาหลักการพื้นฐานของระบบเรดาร์โดยเฉพาะเรดาร์คลื่นต่อเนื่องและเรดาร์ คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่และการประมวลผลสัญญาณเรดาร์
- 2) สร้างต้นแบบฮาร์ดแวร์ของระบบเรดาร์กระป๋องเพื่อนำไปใช้เป็นต้นแบบการศึกษา
- 3) พัฒนาซอฟต์แวร์ประมวลผลของระบบเรดาร์เพื่อการประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับ ความเร็ว และการตรวจจับระยะทาง

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

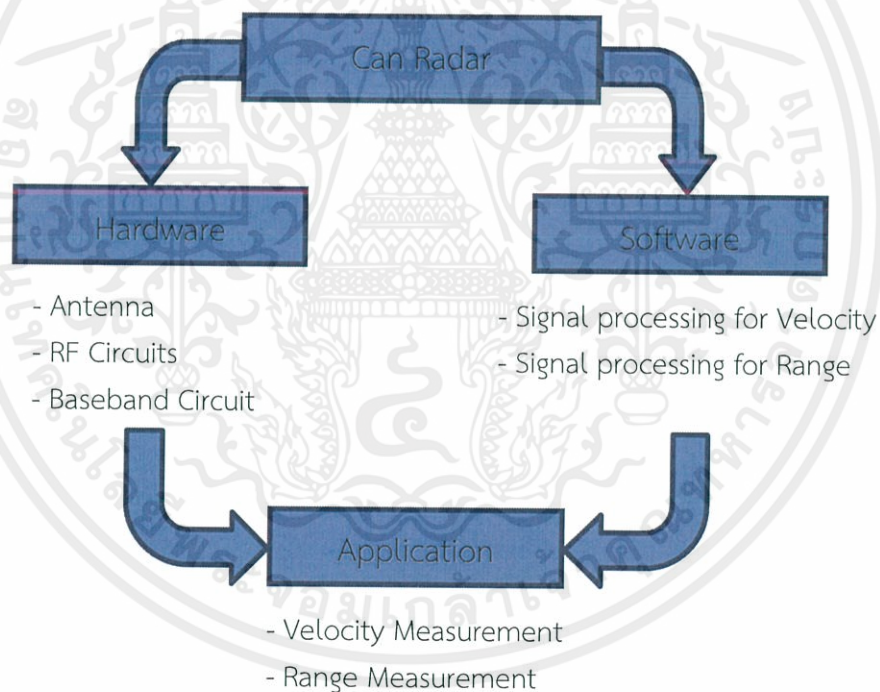
ออกแบบการทำงานของระบบเรดาร์และสร้างระบบต้นแบบในปริญญาโทนี้โดยใช้คลื่นต่อเนื่องและคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ โดยออกแบบส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ออกแบบวงจรสร้างสัญญาณตรงสำหรับระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องโดยให้มีค่าแรงดัน 2 โวลต์ และสร้างวงจรสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่โดยกำหนดให้มีค่าแรงดัน 0 – 5 โวลต์

2) จากค่าแรงดันที่ออกแบบนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ VCO (Voltage control Oscillator) ที่ไปควบคุมทำให้ได้ค่าความถี่ของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ 2.4 GHz และได้ค่าความถี่ของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ที่ 2.26 – 2.59 GHz

3) ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับความเร็วของวัตถุได้ตั้งแต่ 0 ถึง 990 เมตรต่อวินาที

4) ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับระยะทางของวัตถุได้สูงสุด 228 เมตร



รูปที่ 1.1 แผนผังภาพรวมของระบบเรดาร์

โดยแผนผังภาพรวมของระบบเรดาร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 และเมื่อได้ผลเป็นตามที่ต้องการจากการทั้งส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่แสดงข้างต้นแล้วจะนำต้นแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทั้งหมดที่พัฒนาขึ้นมาจัดทำเป็นชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้และนำเสนอแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานของต้นแบบระบบเรดาร์ที่พัฒนาขึ้น

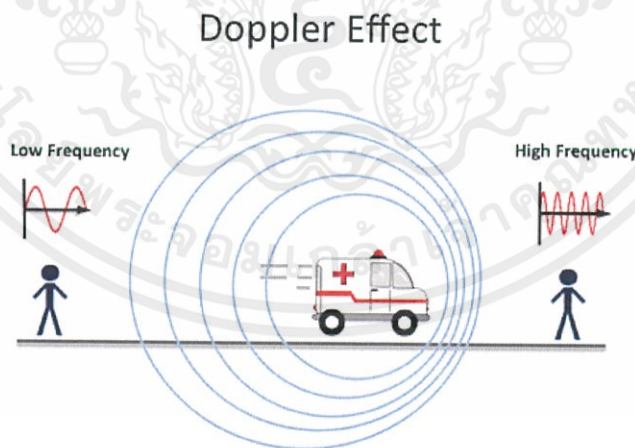
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญญาโทได้ศึกษาและอธิบายถึงหลักการงานของเรดาร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งแบบคลื่นต่อเนื่องและแบบคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่โดยอ้างอิงจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ ตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ชาวออสเตรียที่นำเสนอเรื่องนี้ใน ค.ศ.1842 โดยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์คือ “ปรากฏการณ์ที่ผู้สังเกตมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้ผู้สังเกตได้รับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่เดิม” ตัวอย่างทั่วไปที่สังเกตได้ง่ายคือเมื่อยานพาหนะมีการปล่อยเสียงไซเรนเคลื่อนที่ผ่านและออกห่างผู้สังเกต ความถี่ที่ผู้สังเกตได้รับจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่จริงที่ปล่อยออกมาในระหว่างที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าใกล้ โดยความถี่จะตรงกันในขณะที่ยานพาหนะกำลังผ่านทันทีและจะต่ำกว่าในช่วงที่เริ่มห่างผู้สังเกตออกไป รูปแบบของความถี่นี้ยังขึ้นอยู่กับทิศทางของแหล่งกำเนิดคลื่นที่เคลื่อนที่เทียบกับผู้สังเกต โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากผู้สังเกตโดยตรงและลดลงเมื่อมุมระหว่างทิศทางของการเคลื่อนที่และทิศทางของคลื่นเพิ่มขึ้นจนเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เป็นมุมฉากต่อผู้สังเกตจึงจะไม่เกิดปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ แสดงภาพตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์

การเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency Variation)

สมการสำหรับปรากฏการณ์ดอปเปลอร์จะเหมือนกันกับการสะท้อนแสงด้วยกระจกที่เคลื่อนไหว โดยไม่มีความจำเป็นที่จะใช้ทฤษฎีของไอน์สไตน์เรื่องความสัมพันธ์เพราะข้อสังเกตทั้งหมดเกิดในกรอบอ้างอิงเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะมี c (m/s) เป็นความเร็วของแสงและ v (m/s) เป็นความเร็วของวัตถุเป้าหมายซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตและมีค่าเป็นลบเมื่อเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกตที่ทำให้ความถี่ที่เลื่อนไป f_r (Hz) เป็นฟังก์ชันของความถี่เดิม f_i (Hz) ดังสมการที่ 2.1

$$f_r = f_i \left(\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c} \right) \quad (2.1)$$

ทำให้เป็นรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.2

$$f_r = f_i \left(\frac{c \pm v}{c \mp v} \right) \quad (2.2)$$

Doppler Frequency Shift หรือการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ f_d (Hz) จึงมีค่า ดังสมการที่ 2.3

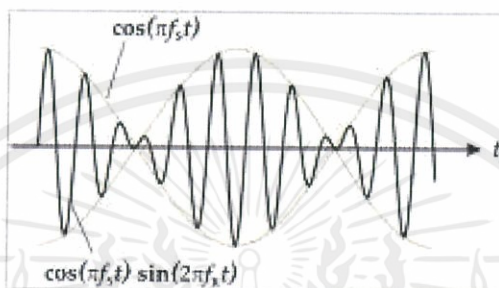
$$f_d = f_r - f_i = 2v \frac{f_i}{(c \mp v)} \quad (2.3)$$

ในการใช้งานจริงโดยส่วนใหญ่จะมีค่า $v \ll c$ ดังนั้น $(c \mp v) \rightarrow c$ เราจึงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.4

$$f_d \approx 2v \frac{f_i}{c} \quad (2.4)$$

2.2 บีต (Beats)

บีตเป็นรูปแบบการแทรกสอดระหว่างสองสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อย มีแอมพลิจูดใกล้เคียงกัน โดยจะซ้อนทับกันและแทรกสอดกัน ถ้าแหล่งกำเนิดมีความถี่เท่ากันจะไม่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โดอะแกรมของความถี่บีต

หลักการของความถี่บีต

ปรากฏการณ์ของบีตสามารถถูกพบได้ในทุกระบบเชิงเส้นแต่ส่วนใหญ่จะเป็นที่รู้จักในด้านดนตรีหรืออะคูสติก โดยสามารถพิสูจน์ได้ว่าเมื่อสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อยมาแทรกสอดกัน กรอบของแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณจะสร้างคลื่นที่มีความถี่เป็นครึ่งหนึ่งของส่วนต่างระหว่างสองความถี่ของคลื่นเดิมทั้งสอง พิจารณาจากสองคลื่นไซน์แอมพลิจูดหนึ่งหน่วย ได้ตั้งสมการที่ 2.5

$$\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t) = 2 \cos\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \quad (2.5)$$

หากความถี่เดิมทั้งสองค่อนข้างใกล้เคียง เช่นส่วนต่างมีค่าประมาณ 12 Hz ความถี่ของโคไซน์ทางด้านขวาของสมการข้างต้น $\frac{f_1 - f_2}{2}$ มักจะมีค่าต่ำกว่าเกินกว่าโทนเสียงที่สามารถได้ยิน จึงจะถูกมองเป็นการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงเวลาทางแอมพลิจูดของพจน์แรกทางฝั่งขวาในสมการข้างต้น อาจกล่าวได้ว่าส่วนความถี่ต่ำกว่าจะเป็นกรอบสัญญาณสำหรับส่วนความถี่ที่สูงกว่า หมายความว่าแอมพลิจูดได้ถูกมอดูเลตโดยที่ความถี่ของการมอดูเลตคือ $\frac{f_1 + f_2}{2}$ ซึ่งคือค่าเฉลี่ยของทั้งสองความถี่ สามารถสังเกตได้ว่าทุกวินาทีที่ของการมอดูเลตสัญญาณจะถูกกลับค่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากหูของ

มนุษย์ไม่ได้มีความไวต่อเฟสของเสียง รับรู้ได้เพียงแค่อัมพลิจูดหรือความเข้ม จึงมีแค่ขนาดของกรอบสัญญาณเท่านั้นที่จะถูกได้ยิน ดังนั้นความถี่ของกรอบสัญญาณจึงดูเหมือนจะมีค่าเท่ากับสองเท่าของความถี่ในการมอดูเลตของสัญญาณโคไซน์ ซึ่งหมายความว่าความถี่บีต f_b (Hz) ที่ดังสมการที่ 2.6

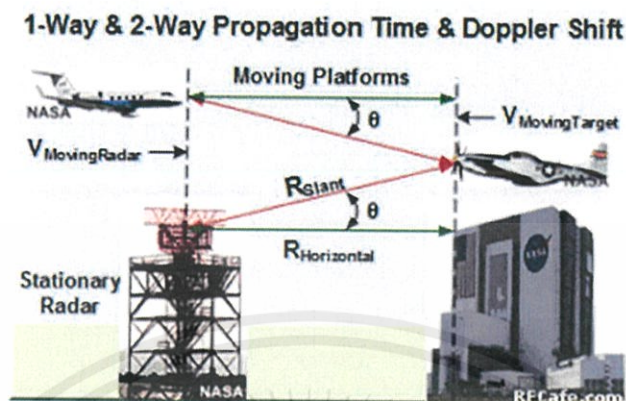
$$f_b = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (2.6)$$

หากเทียบกับการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ซึ่งเท่ากับส่วนต่างของความถี่สัญญาณส่งและรับ f_1, f_2 โดยมองความถี่ของคลื่นสองคลื่น เป็นความถี่คลื่นส่งและรับจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่บีตและความถี่ดอปเปลอร์ดังสมการที่ 2.7

$$f_b = \frac{f_d}{2} \quad (2.7)$$

2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์ (RADAR)

เรดาร์ เป็นระบบที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเครื่องมือในการระบุระยะ ความสูง (altitude) รวมถึงทิศทางหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ เดิมทีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1941 คำว่า "เรดาร์" ในภาษาอังกฤษสะกดด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ คือ RADAR และย่อมาจากคำว่า Radio Detection and Ranging ระบบเรดาร์โดยทั่วไปประกอบด้วยเครื่องส่งสัญญาณที่ผลิตสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกส่งผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ โดยสายอากาศ เมื่อสัญญาณนี้กระทบวัตถุใดๆ จะได้รับการสะท้อนหรือแพร่กระจายในหลายทิศทาง สัญญาณสะท้อนนี้ได้รับจากสายอากาศเรดาร์ซึ่งส่งไปยังเครื่องรับซึ่งจะมีการประมวลผลเพื่อกำหนดสถิติทางภูมิศาสตร์ของวัตถุ ระยะถึงวัตถุจะคำนวณได้โดยการคำนวณเวลาที่สัญญาณใช้เดินทางจากเรดาร์ไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับ และจะใช้ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ในการทดสอบความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่ โดยระบบเรดาร์จะทำงานด้วยหลักการเบื้องต้นที่คล้ายคลึงกันโดยเรดาร์จะทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยการส่งคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ไมโครเวฟซึ่งถือว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งเพื่อพิจารณาคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระจายสู่บรรยากาศด้วยความเร็วแสงและมีผลกระทบต่อวัตถุที่อยู่ตามแนวเส้นทางเดินของมัน โดยเมื่อตกกระทบวัตถุใดๆ จะมีผลทำให้เกิดการสะท้อน การเปียงเบน และการหักเหของคลื่น ซึ่งเรานำเอาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาความเร็วและระยะทางของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.3 [13]



รูปที่ 2.3 การทำงานของเรดาร์ที่หยุดนิ่งกับเป้าหมายที่เคลื่อนที่

2.3.1 ประเภทของเรดาร์

เรดาร์สามารถแบ่งตามประเภทของการทำงานได้เป็น 2 ประเภท

2.3.1.1 Active Radar

เรดาร์แบบ active คือเรดาร์ส่วนใหญ่ที่เราคุ้นเคย ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างง่าย โดยคลื่นวิทยุจะถูกปล่อยออกมาจากสายอากาศฝั่งส่งเพื่อให้กระทบกับวัตถุเป้าหมาย สัญญาณจะสะท้อนกลับไปยังตำแหน่งที่สายอากาศปล่อยสัญญาณซึ่งเป็นที่เดียวกับที่สายอากาศฝั่งรับจะคอยรับสัญญาณสะท้อนไว้ เรดาร์ชนิดนี้จึงถือเป็น monostatic เมื่อเครื่องส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณของระบบเรดาร์อยู่ที่เดียวกัน

เมื่อได้รับสัญญาณสะท้อนจึงจะสามารถกำหนดระยะห่างระหว่างระบบเรดาร์และวัตถุเป้าหมายได้ด้วยการคำนวณ time-of-flight เนื่องจากความเร็วของคลื่น RF ในอากาศเท่ากับความเร็วของแสง c (m/s) และ t (s) คือเวลาตั้งแต่การปล่อยและการรับสัญญาณของเรดาร์ซึ่งจะเป็นระยะไป - กลับสู่เป้าหมาย ดังนั้นระยะ R (m) ไปยังวัตถุจึงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

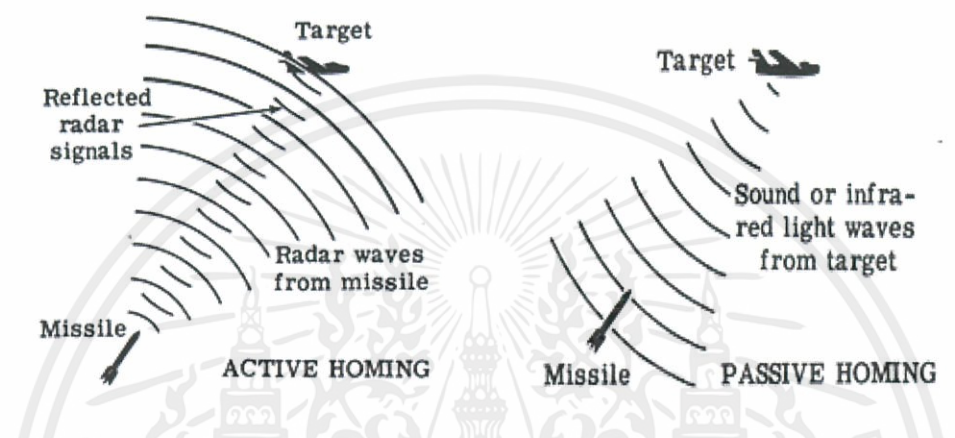
$$R = \frac{ct}{2} \quad (2.8)$$

2.3.1.2 Passive Radar

เรดาร์แบบ passive จะใช้สัญญาณส่งจากสายอากาศฝั่งส่งที่ตั้งอยู่ในสถานที่ที่แตกต่างจากสายอากาศฝั่งรับ จึงถือเป็นเรดาร์ชนิด bistatic โดยการกำหนดระยะทางของ

เรดาร์ประเภทนี้จะทำโดยการคำนวณความล่าช้าระหว่างสัญญาณที่ได้รับโดยตรงจากเครื่องส่งสัญญาณและสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุเป้าหมาย

สามารถแสดงการทำงานและความแตกต่างของเรดาร์ทั้ง 2 ชนิดได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เรดาร์แบบ Active และเรดาร์แบบ Passive

2.3.2 การจำแนกชนิดของเรดาร์

การจำแนกชนิดของเรดาร์สามารถพิจารณาได้อย่างกว้างๆ ได้ 4 แบบดังนี้

2.3.2.1 จำแนกตามที่ตั้งของสายอากาศฝั่งรับและสายอากาศฝั่งส่ง

1) Monostatic Radar เรดาร์ชนิดนี้ใช้สายอากาศรับและส่งร่วมกันโดยสวิตช์อัตโนมัติ เรียกว่า ดูเพล็กซ์เซอร์ (Duplexer) หรือ TR – Switch ทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณรับและสัญญาณส่งไม่ให้เป็นกัน เรดาร์ส่วนใหญ่นิยมใช้ระบบนี้เพื่อเป็นการประหยัดสายอากาศ

2) Bistatic Radar ระบบนี้ใช้สายอากาศรับและส่งแยกกัน ปกติเรดาร์ชนิดนี้มักจะใช้กับคลื่นต่อเนื่อง หรือคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

3) Multistatic Radar เป็นเรดาร์แบบหลายทิศทาง หรือเป็น Bistatic Radar ที่ใช้พื้นที่ครอบคลุมร่วมกัน ทำให้เห็นมุมมองที่แตกต่างกันของเป้าหมาย สามารถดูได้พร้อมกัน ศักยภาพในการได้รับข้อมูลสามารถทำให้เกิดข้อได้เปรียบมากกว่าระบบทั่วไป

2.3.2.2 จำแนกตามรูปแบบของคลื่น

1) เรดาร์คลื่นต่อเนื่องจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถือเป็นคลื่นต่อเนื่องทางเวลา โดยแบ่งเป็นเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบไม่มีการมอดูเลต (Unmodulated CW Radar หรือ CW Radar) กับเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ โดยทั่วไปเรดาร์ชนิดนี้จะใช้สำหรับการทดสอบความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ โดยอาศัยความถี่ดอปเปลอร์ที่ได้จากสัญญาณฝั่งรับ

2) Frequency Modulated Continuous Wave Radar หรือ โหมดความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ เป็นเรดาร์แบบคลื่นต่อเนื่องที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในระหว่างการส่งและรับสัญญาณ โดยสัญญาณจะถูกมอดูเลตทางความถี่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถวัดค่าเวลาในการทำงานหรือรันไทม์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่หรือเฟสเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระยะถึงเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ได้จากค่าของความถี่บีต ที่ได้รับจากสายอากาศฝั่งรับ

3) Pulse Radar เป็นเรดาร์ที่ใช้สัญญาณส่งเป็นคลื่นพัลส์โดยการส่งกำลังค่าสูงและคลื่นความถี่สูงไปยังเป้าหมาย จากนั้นรอสัญญาณสะท้อนจากวัตถุก่อนจะส่งพัลส์ถัดไป ช่วงและความละเอียดของเรดาร์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของการส่งพัลส์ซ้ำ หลักการของเรดาร์นี้จะตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่โดยใช้ การเลื่อนดอปเปลอร์ ซึ่งถือว่าสัญญาณสะท้อนจากวัตถุที่หยุดนิ่งจะมีเฟสเดียวกับสัญญาณส่งขณะที่สัญญาณสะท้อนจากวัตถุเคลื่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟส พัลส์เรดาร์จะสามารถทดสอบความเร็วของวัตถุโดยอาศัยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์และทดสอบระยะทางถึงวัตถุโดยอาศัยเทคนิคการวัดคาบเวลาของพัลส์

2.3.2.3 จำแนกตามการสะท้อนกลับของสัญญาณ

1) Primary Radar สัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุไปยังเครื่องรับ เป็นสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุนั้นโดยตรง

2) Secondary Radar สัญญาณที่สะท้อนไม่ใช่สัญญาณสะท้อนจากตัววัตถุโดยตรงแต่จะเกิดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในวัตถุ ซึ่งเป็นอุปกรณ์จำพวกเครื่องส่งรีเลย์หรือทรานสปอนเดอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ ในบางกรณีในการส่งคลื่นไปในบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งเมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุทำให้สัญญาณการสะท้อนกลับไม่แรงพอจึงต้องใช้ตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ติดไปกับวัตถุเพื่อให้คลื่นนั้นแรงพอ

2.3.2.4 จำแนกตามการทำงานหลัก

1) Detection Radar เป็นเรดาร์ที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุ โดยเรดาร์จะปล่อยคลื่นวิทยุซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงและสะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์เรดาร์ จึงสามารถคำนวณหาระยะห่างของวัตถุเพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งของวัตถุได้

2) Search Radar เป็นเรดาร์ที่ออกแบบมาสำหรับค้นหาตำแหน่งโดยประมาณของวัตถุ โดยมักจะหาในแนวตั้งมากกว่าในแนวนอนทำให้สามารถสแกนพื้นที่ขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนมากใช้สำหรับการเตือนภัยล่วงหน้าเกี่ยวกับการควบคุมและการสกัดกั้นทางบกและการควบคุมการจราจรทางอากาศ

3) Tracking Radar เป็นเรดาร์ติดตามที่ใช้ในการตรวจสอบการบินและรับข้อมูลกรณีพิลึกจากยานสำรวจอวกาศดาวเทียมและจรวด

4) Terrain Avoidance Radar เป็นเรดาร์ทางอากาศที่ใช้ในทางการบิน โดยจะแสดงลักษณะภูมิประเทศก่อนเครื่องบินจะลดระดับลงเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางในแนวระนาบ

2.3.3 ย่านความถี่ของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 300 MHz ถึง 40 GHz ซึ่งเรียกว่า ความถี่ไมโครเวฟ แสดงตามตารางที่ 2.1 และนิยมใช้ตัวอักษรกำหนดแบนด์ของความถี่ด้วย ตารางที่ 2.1 ความถี่ของเรดาร์กับการใช้งานต่างๆ

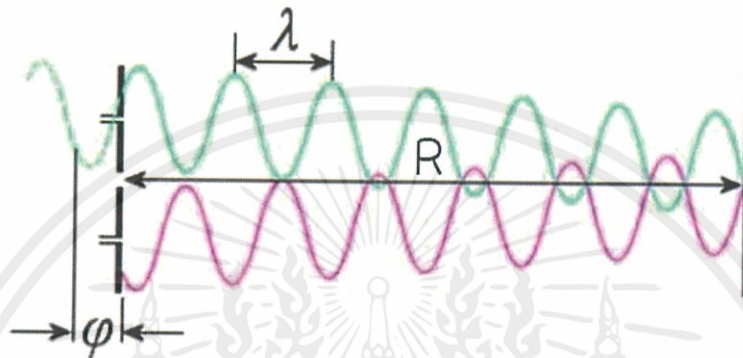
Band	Wavelength (cm)	Frequency range (MHz)
P	136 - 77	220 - 390
UHF	100 - 30	300 - 1,000
L	30 - 15	1,000 - 2,000
S	15 - 7.5	2,000 - 4,000
C	7.5 - 3.75	4,000 - 8,000
X	3.75 - 2.40	8,000 - 12,500
Ku	2.40 - 1.67	12,500 - 18,000
K	1.67 - 1.18	18,000 - 26,500
Ka	1.18 - 0.75	26,500 - 40,000

2.4 เรดาร์คลื่นต่อเนื่อง

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบไม่มีการมอดูเลตจะปล่อยความถี่คงที่และค่าแอมพลิจูดคงที่ สัญญาณสะท้อนที่ได้รับนั้นจะมีความถี่เท่าเดิมหรือจะเลื่อนไปตามความถี่ดอปเปลอร์ โดยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ใช้ในการวัดความถี่ดอปเปลอร์นี้เรียกว่าเรดาร์ดอปเปลอร์

2.4.1 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องกับวัตถุหยุดนิ่ง

เรดาร์ตอบเพลอร์จะใช้เพื่อการทดสอบความเร็วเนื่องจากเรดาร์คลื่นต่อเนื่องสามารถตรวจจับความเร็วของวัตถุผ่านทางความถี่ตอบเพลอร์เท่านั้น หากเป้าหมายไม่มีการเคลื่อนที่จะไม่เกิดความถี่ตอบเพลอร์ โดยจากรูปที่ 2.5 จะสามารถวิเคราะห์สัญญาณส่งและรับได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ความต่างเฟสของสัญญาณฝั่งส่งและฝั่งรับ

ให้สัญญาณส่ง $x_t(t)$ โดยมี A เป็นแอมพลิจูด และมีความถี่กลางที่ $f_c = 2.4 \text{ GHz}$ ดังสมการที่ 2.9

$$x_t(t) = A \cos(2\pi f_c t) \quad (2.9)$$

เมื่อสัญญาณส่งกระทบวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่ องค์ประกอบความถี่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีเฟสเกิดขึ้นจากรยะเวลาที่สัญญาณใช้เดินทางหรือเวลาล่าช้า τ (s) ได้สัญญาณรับ $x_r(t)$ ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$x_r(t) = x_t(t - \tau) = A \cos(2\pi f_c (t - \tau)) \quad (2.10)$$

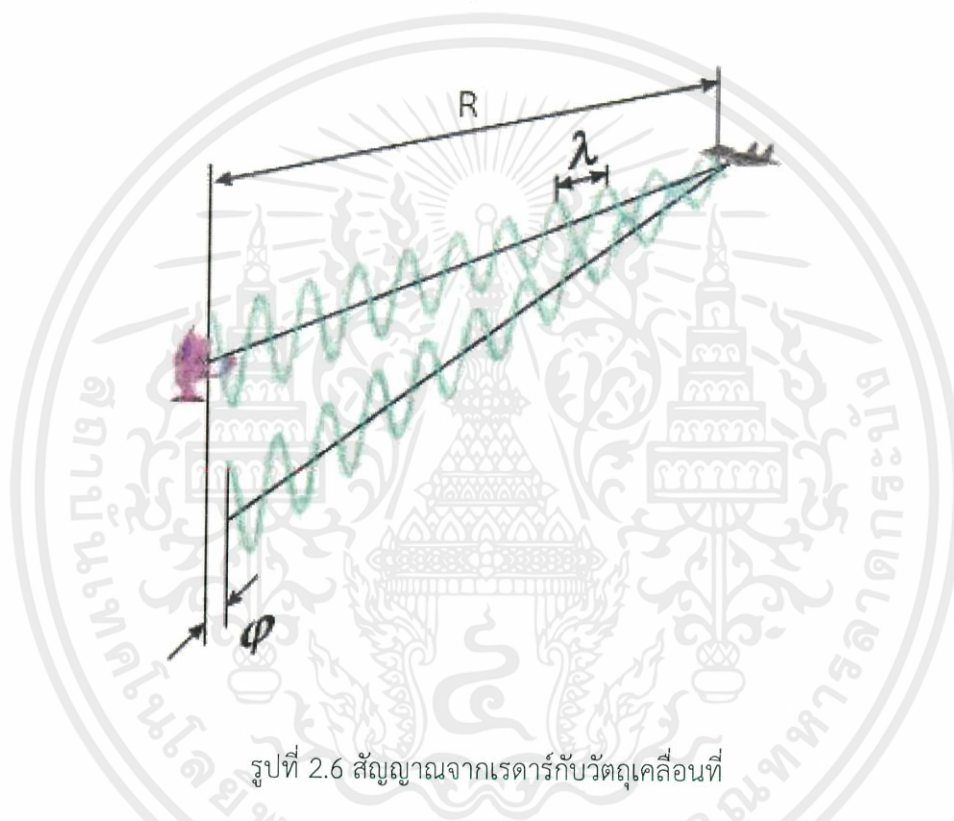
$$x_r(t) = A(\cos(2\pi f_c t - 2\pi f_c \tau)) \quad (2.11)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาล่าช้ากับระยะทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้เดินทาง $R = \frac{c\tau}{2}$ ทำให้มีค่าเฟส ϕ ดังสมการที่ 2.12

$$\varphi = -\frac{2\pi \cdot 2Rf_c}{c} \quad (2.12)$$

เรดาร์จะไม่สามารถกำหนดระยะทางได้เนื่องจากไม่มีการจับเวลาการเดินทางไป – กลับถึงเป้าหมายของสัญญาณส่ง

2.4.2 เรดาร์เคลื่อนที่เนื่องกับวัตถุเคลื่อนที่



รูปที่ 2.6 สัญญาณจากเรดาร์กับวัตถุเคลื่อนที่

สำหรับวัตถุเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สัญญาณส่งที่ตกกระทบวัตถุและสัญญาณสะท้อนที่สะท้อนออกจากวัตถุจะมีค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปด้วยเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ หากพิจารณาให้สัญญาณส่งเหมือนกับสมการที่ 2.9 จะได้สัญญาณตกกระทบวัตถุดังสมการที่ 2.13

$$x_r(t) = A(\cos(2\pi f_r t)) \quad (2.13)$$

โดยที่ f_r (Hz) คือค่าความถี่ที่เลื่อนไปจากความเร็วของวัตถุ

หลังจากสัญญาณตกกระทบและสะท้อนออกจากวัตถุเคลื่อนที่แล้ว ก็จะถูกปรับโดยสายอากาศฝั่งรับ และจึงได้สัญญาณฝั่งรับหลังผ่านเวลาล่าช้า τ ดังสมการที่ 2.14

$$x_r(t) = A \cos(2\pi f_r(t-\tau)) = A(\cos(2\pi f_r t - 2\pi f_r \tau)) \quad (2.14)$$

เมื่อให้เฟส ณ เวลานั้นๆ เท่ากับ $\varphi = 2\pi f_r \tau$ สัญญาณภาครับจึงเหลือดังสมการที่ 2.15

$$x_r(t) = A \cos(2\pi f_r t - \varphi) \quad (2.15)$$

สัญญาณที่ $v(t)$ เป็นการคูณกันของสัญญาณส่งและรับในวงจรภาครับจะได้ดังสมการที่ 2.16

$$v(t) = x_t(t)x_r(t) = \frac{A^2}{2} (\cos(2\pi f_r - 2\pi f_c)t - \varphi) \quad (2.16)$$

ซึ่งเป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยส่วนของความถี่ตอบเพลอร์ซึ่งคำนวณจากผลต่างของความถี่ฝั่งส่งและฝั่งรับ จึงจะได้สมการการเลื่อนความถี่ตอบเพลอร์ f_d (Hz) ดังสมการที่ 2.17

$$f_d = f_r - f_c \quad (2.17)$$

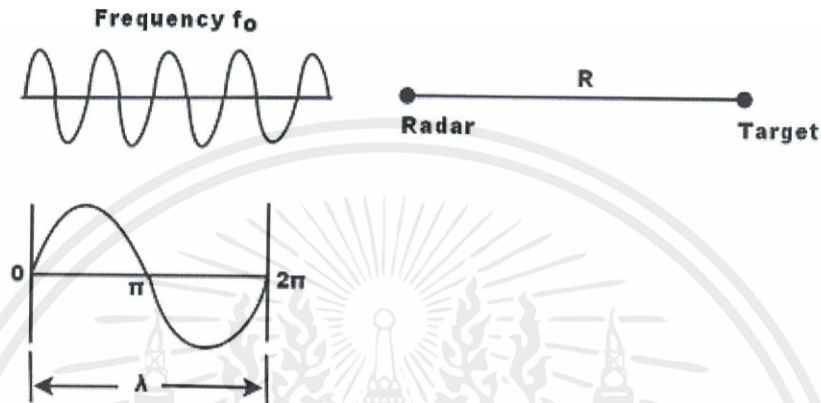
ได้ดังสมการที่ 2.18

$$v(t) = \frac{A^2}{2} (\cos 2\pi f_d t - \varphi) \quad (2.18)$$

เมื่อให้จำนวนลูกคลื่นของสัญญาณระหว่างเรดาร์และเป้าหมายเท่ากับ $n = \frac{2R}{\lambda}$ และเนื่องจากหนึ่งความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับการเพิ่มค่าเชิงมุม 2π ในหน่วยเรเดียนดังแสดงในรูปที่ 2.7 จึงจะได้ค่าเฟสทั้งหมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างการเดินทางจากเรดาร์ถึงเป้าหมายและสะท้อนกลับสู่เรดาร์ดังสมการที่ 2.19

$$\varphi = \frac{2R}{\lambda_c} \cdot 2\pi \quad (2.19)$$

โดย φ (rad) คือฟังก์ชันความต่างเฟสระหว่างสัญญาณส่งและรับ ณ ตำแหน่งต่างๆ R (m) คือระยะทางระหว่างสายอากาศและวัตถุ และ λ_c (m) คือค่าความยาวคลื่นของความถี่กลางที่ใช้ในระบบ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับระยะทางจากเรดาร์ถึงเป้าหมาย

เมื่อวัตถุกำลังเคลื่อนที่ ทั้งระยะทางและเฟสก็จะมีการเปลี่ยนแปลง จึงจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของ φ เทียบเวลาดังสมการที่ 2.20

$$\frac{d(\varphi)}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda_c} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (2.20)$$

เมื่อนำไปเทียบกับความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ต่อเพลอร์ ω_d (rad / s) = $2\pi f_d$ จะได้ตั้งสมการที่ 2.21

$$2\pi f_d = -\frac{4\pi}{\lambda_c} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (2.21)$$

ถ้าวัตถุเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v = \frac{dR}{dt}$ จะได้ค่าการเคลื่อนที่ต่อเพลอร์ f_d (Hz) ดังสมการที่ 2.22

$$f_d = \frac{-4\pi \cdot v}{2\pi \lambda_c} \quad (2.22)$$

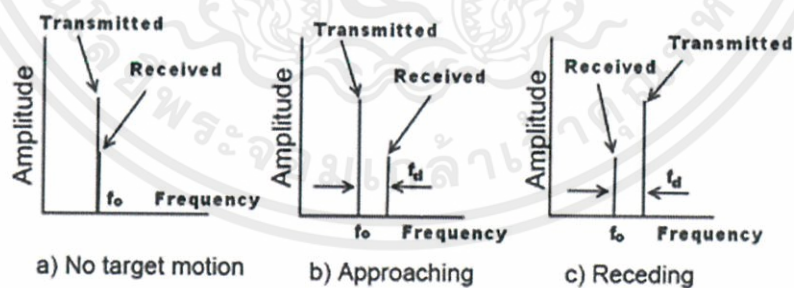
เมื่อแทนค่าสมการ $f_c = c/\lambda_c$ ที่มี λ_c (m) เป็นความยาวคลื่นของความถี่กลางที่ใช้ในระบบลงในสมการ 2.23 จะได้ค่า f_d (Hz) ดังสมการที่ 2.23

$$|f_d| = \frac{2v}{\lambda_c} = \frac{2vf_c}{c} \tag{2.23}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ จากวัตถุที่มีความเร็วเช่น พิจารณาเรดาร์คลื่นต่อเนื่องดอปเปลอร์ ที่ส่งสัญญาณความถี่กลาง $f_c = 2.4 \text{ GHz}$ หากวัตถุเป้าหมายกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 MPH เข้าสู่เรดาร์โดยตรง ก็จะได้ผลลัพธ์ทางสายอากาศฝั่งรับเป็นสัญญาณโซนูซอยด์ที่มีการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ $f_d = 34 \text{ Hz}$

เมื่อนำสัญญาณที่ส่งไปเทียบกับสัญญาณที่ได้รับจะสามารถเห็นถึงความต่างเฟสได้ดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากสัญญาณที่ส่งกับสัญญาณที่ได้รับอยู่ในรูปคลื่นไซน์ที่มีมอดุ้ประกอบความถี่ 2.4 GHz เหมือนกัน การนำสัญญาณผลลัพธ์มาประมวลผลจึงเป็นการวิเคราะห์ค่าความต่างเฟสตามเวลาหรือความถี่ ดอปเปลอร์ ที่เกิดขึ้นเพื่อหาความเร็วของวัตถุเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่

หากพิจารณาตามรูปที่ 2.8 ถ้าความถี่ของสัญญาณฝั่งรับเท่ากับความถี่ของสัญญาณฝั่งส่งดังรูปที่ 2.8a แสดงว่าไม่เกิดการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์และเป้าหมายไม่มีการเคลื่อนที่ ถ้าความถี่ของสัญญาณฝั่งรับมากกว่าความถี่ของสัญญาณฝั่งส่งดังรูปที่ 2.8b แสดงว่าการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์เป็นค่าบวกและเป้าหมายกำลังเคลื่อนที่เข้าใกล้เรดาร์ และถ้าความถี่ของสัญญาณฝั่งรับน้อยกว่าความถี่ของสัญญาณฝั่งส่งดังรูปที่ 2.8a แสดงว่าการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ เป็นค่าลบและเป้าหมายกำลังเคลื่อนที่ออกห่างจากเรดาร์



รูปที่ 2.8 ความถี่ของสัญญาณฝั่งส่งและสัญญาณฝั่งรับ

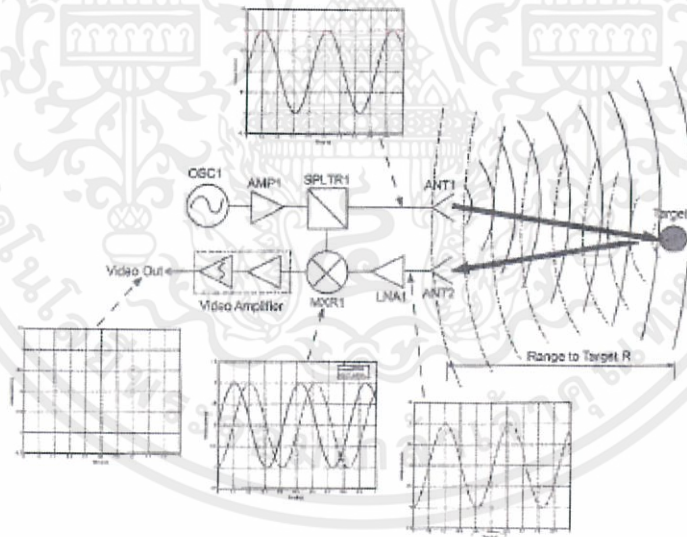
หลังจากสัญญาณฝั่งส่งและรับคูณกันใน Mixer สัญญาณเอาต์พุตของ Mixer ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนความถี่สูงจากค่าความถี่ของสัญญาณฝั่งส่งและส่วนความถี่ต่ำในส่วนของ

ความถี่ดอปเปลอร์ จะเข้าสู่วงจร Video Amplifier เพื่อถูกขยายและกรองส่วนความถี่สูงออกด้วย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อเหลือแต่สัญญาณ Baseband ที่มีการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์อยู่ หลังจากนั้นสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ ที่ออกจากวงจร Video Amplifier ซึ่งเป็นสัญญาณในโดเมนเวลา จึงถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนจะนำเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางความถี่เพื่อให้ได้ความถี่ดอปเปลอร์ด้วยการแปลงฟูเรียร์แล้วจึงสามารถนำไปคำนวณค่าความเร็วของเป้าหมายที่เคลื่อนที่ตามสมการที่ 2.23 แล้วจึงแสดงผลโดย spectrogram ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.4.3 สถาปัตยกรรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง

ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องดอปเปลอร์ ส่วนใหญ่จะสร้างตามสถาปัตยกรรมของเรดาร์แบบ Phase Coherent ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งอาศัยหลักการที่คลื่นพาห์แบบต่อเนื่อง (CW carrier) ถูกส่งไปกระทบและสะท้อนกลับจากเป้าหมายที่หยุดนิ่งทำให้ได้สมการความล่าช้าของเฟสซึ่งแปรผันตรงกับระยะทางจากเรดาร์ถึงเป้าหมายดังสมการที่ 2.19 [1]

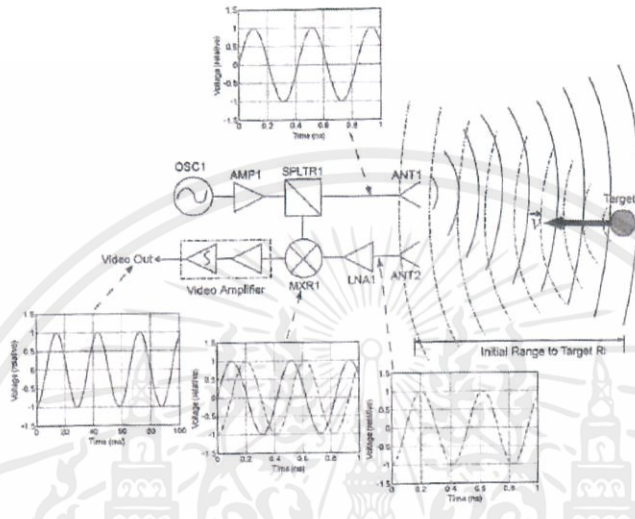
เพียงแต่ในกรณีของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องดอปเปลอร์ วัตถุเป้าหมายจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v โดยที่ v คือเวกเตอร์โพรงฉากชั้นความเร็วของวัตถุเป้าหมายในทิศตั้งฉากต่อลำคลื่นจากเรดาร์



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบ Phase Coherent

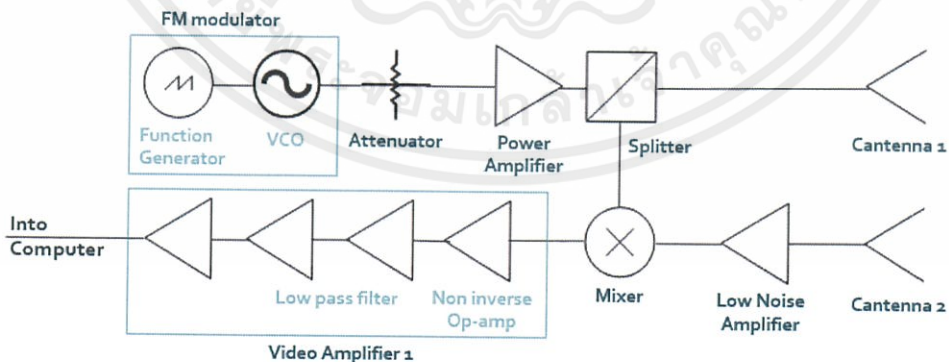
ในปริณยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้สถาปัตยกรรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องดอปเปลอร์ดังรูปที่ 2.10 โดยมีบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 2.11 ซึ่ง OSC1 ประกอบไปด้วย VCO ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุม (VCO) ทำหน้าที่ bias ที่ความถี่กลาง 2.4 GHz เมื่อถูกบ่อน

อินพุตจาก Function Generator เป็นสัญญาณไฟตรงขนาด 2 โวลต์ โดยความถี่ 2.4 GHz อยู่ในแถบ ISM band ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ในด้านอุตสาหกรรมการแพทย์และวิทยาศาสตร์ เอาดต์พุตของ VCO ถูกลดขนาดลงเล็กน้อยจากตัว attenuator



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์คลื่นต่อเนื่องคอปเปอเรอร์

จากนั้นถูกขยายด้วย Power Amplifier ซึ่งเป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำที่สามารถรับกำลังไฟ 18.5 dBm ตัว Attenuator จึงทำหน้าที่ป้องกัน PA1 จากการอิ่มตัวจากสัญญาณอินพุตที่มีกำลังสูงเกิน เอาดต์พุตของ Power Amplifier ถูกป้อนเข้าไปในตัว Splitter เพื่อแยกสัญญาณ ครึ่งหนึ่งของเอาต์พุตของ Splitter ถูกป้อนเข้ากับสายอากาศส่ง Antenna1 ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะถูกป้อนเข้าไปในของเครื่องผสมสัญญาณ (Mixer) แสดงการทำงานที่กล่าวมาได้ด้วยรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ใช้ในโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cantenna1 ถือเป็นสายอากาศแบบท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Circular Waveguide) ที่มีความถี่ 2.4 GHz สายอากาศนี้สร้างจากกระป๋องอลูมิเนียมขนาดเล็ก มีค่าอัตราการขยายเฉลี่ย 14.54 dBi และค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณ 64 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบ

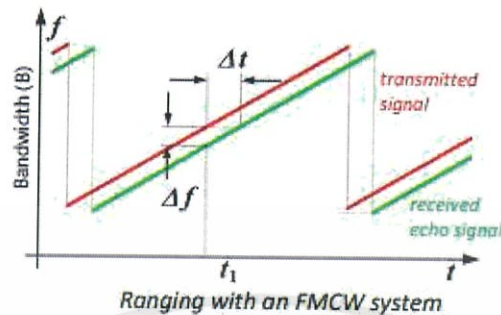
Cantenna1 แพร่กระจายสัญญาณไปยังเป้าหมายและพลังงานที่สะท้อนกระจัดกระจายกลับมากจะถูกรวบรวมโดย Cantenna2 โดยมี Low Noise Amplifier เป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุตจาก Cantenna2 แล้วจึงป้อนเข้าเข้าไปในพอร์ต RF (Radio Frequency) ของ Mixer โดยในส่วนพอร์ต LO (Local Oscillator) ของ Mixer จะถูกป้อนสัญญาณจาก Splitter สัญญาณเอาต์พุตจาก Mixer จึงเป็นการคูณคลื่นพาห์ คลื่นต่อเนื่อง ด้วยสัญญาณที่รับได้ เป็นการทำให้ระบบเรดาร์นี้เป็นแบบ Phase Coherent

สัญญาณเอาต์พุตของ Mixer ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ audio หรือเป็นสัญญาณเสียงจะผ่านวงจร Video Amp1 ซึ่งจะรวมถึงการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายไม่กลับเฟสตามด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำลำดับที่ 2 แบบ Butterworth ที่มีความถี่ cut off ประมาณ 15 kHz โดยสร้างจากไอซีแบบ quad op amp เอาต์พุตของ Video Amp1 จะถูกป้อนเข้าไปในสายสัญญาณเสียงขนาด 3.5 มม. ซึ่งต่อเข้ากับพอร์ตอินพุตเสียงของคอมพิวเตอร์ซึ่งสัญญาณเสียงจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล โดยวงจรที่อยู่ร่วมกับวงจร Video Amplifier คือ วงจรกำเนิดสัญญาณ และส่วนไฟตรง bias เพื่อเลือกความถี่ให้ระบบเรดาร์ทำงานในโหมดความถี่ต่อเนื่อง

2.5 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulated Continuous Wave Radar : FMCW Radar) เป็นเรดาร์แบบคลื่นต่อเนื่องที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในระหว่างการส่งและรับสัญญาณ โดยสัญญาณจะถูกมอดูเลตทางความถี่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถวัดค่าเวลาในการทำงานหรือรันไทม์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่หรือเฟส เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระยะถึงเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ได้

ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบง่าย ๆ โดยไม่มีการมอดูเลตความถี่มีข้อเสียคือไม่มีการวัดเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณซึ่งสามารถนำไปแปลงเป็นระยะได้ แต่หากใช้วิธีการมอดูเลตความถี่ของสัญญาณที่ส่ง สัญญาณจะมีการเพิ่มหรือลดความถี่เป็นระยะ ๆ เมื่อมีสัญญาณสะท้อนกลับมายังสายอากาศฝั่งรับ การเปลี่ยนแปลงความถี่ดังกล่าวจะทำให้เกิดความล่าช้า Δt (s) เหมือนกับในเทคนิคเรดาร์พัลส์ อย่างไรก็ตามในเรดาร์พัลส์ จะต้องวัดระยะเวลาในการทำงานโดยตรงแต่ในเรดาร์ คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ จะวัดระยะเวลาการทำงานโดยการวัดความแตกต่างของเฟสหรือความถี่ระหว่างสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับแทนดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ฝั่งส่งและรับ

การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นแบบเชิงเส้นในช่วงกว้างทำให้เรดาร์สามารถกำหนดระยะได้จากการเปรียบเทียบความถี่ ความแตกต่างของความถี่ Δf (Hz) แปรผันตรงกับระยะทาง R (m) เนื่องจากมีเพียงค่าบวกของความแตกต่างความถี่เท่านั้นที่สามารถทดสอบได้ (ไม่สามารถหาค่าลบของความถี่ได้) ผลที่ได้คือความถี่ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับความถี่ที่ลดลง ในสถานการณ์แบบเป้าหมายคงที่ที่ไม่มีผลตอบเปเลอร์

- ความละเอียดของช่วงระยะ (Range Resolution)

ความละเอียดของช่วงระยะคือพารามิเตอร์เพื่อบอกว่าระบบเรดาร์สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสองเป้าหมายในช่วงระยะหนึ่งได้ดีแค่ไหน ความละเอียดของช่วงระยะจึงเป็นระยะทางต่ำสุดที่เกิดขึ้นจริงระหว่างสองเป้าหมายก่อนที่จะไม่สามารถถูกแยกจากกันได้ในช่วงระยะหนึ่ง ความละเอียดของช่วงระยะที่ควรเกิดขึ้นถูกกำหนดให้เป็นจุดที่มีค่า -3 dB ต่ำกว่าค่าตอบสนองสูงสุดของเป้าหมาย สำหรับระบบเรดาร์ FM เชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับการมอดูเลตแบบ chirp ค่าความละเอียดของช่วงระยะ ρ_r (m) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.24

$$\rho_r = \frac{c}{2B}, \quad (2.24)$$

โดยที่ c (m/s) คือความเร็วของแสง และ B (Hz) คือแบนด์วิดท์ของสัญญาณมอดูเลตความถี่ที่ส่งไป

การประเมินสำหรับ ความละเอียดของช่วงระยะไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากลำดับขั้นที่สูงกว่าเช่น ความเชิงเส้นของแหล่งที่มาของ chirp การมอดูเลตความถี่, การเหลื่อมกันของการส่งและรับสัญญาณพัลส์ และการประมวลผลแบนด์วิดท์ของฝั่งรับ การประเมินนี้ควรเกิดจากแหล่งที่มา

ที่เป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์, การเคลื่อนที่รับได้ของการส่งและรับพัลส์, และแบนด์วิดท์การประมวลผลฝั่งรับที่เพียงพอสำหรับสัญญาณพัลส์

- ช่วงระยะสูงสุด (Maximum Range)

สำหรับระบบเรดาร์มอดูเลตความถี่ที่มีการเกิดสัญญาณจากวงจรมอดูเลเตอร์เป็นรูปแบบซ้ำอย่างต่อเนื่อง จะสามารถหาระยะทางสูงสุดที่สามารถตรวจจับวัตถุได้ดังสมการที่ 2.25

$$R_{\max} = \frac{c \times \rho_r}{2}, \quad (2.25)$$

โดยที่ ρ_r (m) คือ ความละเอียดของช่วงระยะของระบบ

2.5.1 การประมวลผลสัญญาณของคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

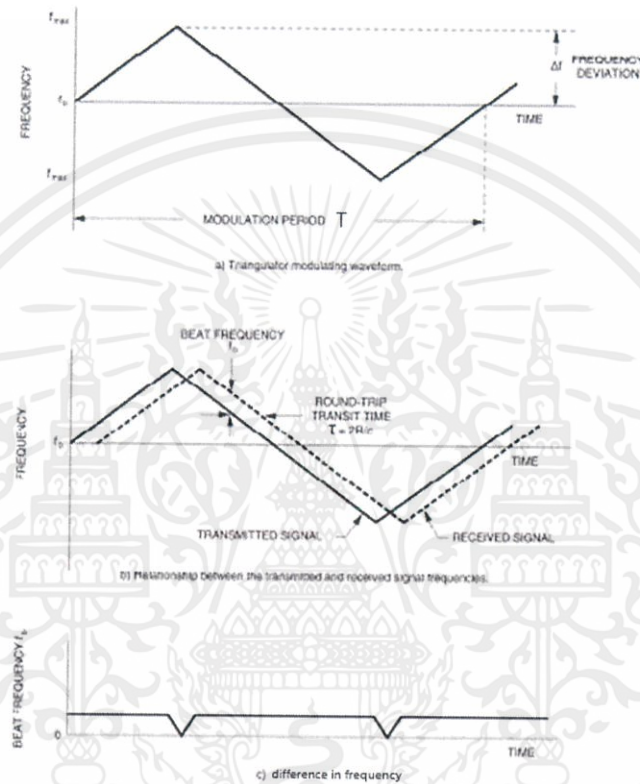
เรดาร์คลื่นต่อเนื่องจะส่งสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความถี่และถึงแม้ว่าสัญญาณสะท้อนอาจถูกเลื่อนในความถี่เนื่องจากมีปรากฏการณ์ดอปเปลอร์แต่เรดาร์จะไม่สามารถกำหนดระยะเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางไปยังเป้าหมายหรือเวลาล่าช้าได้ ดังนั้นเพื่อวัดเวลาล่าช้านี้ ในระบบเรดาร์อาจต้องมีเครื่องจับเวลาบางชนิด โดยเวลาเดินทางไปกลับจากสายอากาศฝั่งส่งไปยังเป้าหมายที่ระยะ R (m) และกลับไปที่ยาสายอากาศฝั่งรับจะล่าช้าเป็นเวลา τ (s) ทำให้สามารถคำนวณระยะทางถึงเป้าหมายได้ดังสมการที่ 2.26

$$R = \frac{2\tau}{c} \quad (2.26)$$

การใช้สัญญาณส่งแบบมอดูเลตทางความถี่ซึ่งเป็นคลื่นต่อเนื่องมีการเปลี่ยนแปลงทางความถี่อย่างต่อเนื่องจะสามารถทำให้คำนวณระยะถึงเป้าหมายได้เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางไปกลับถึงเป้าหมายจะมีการใช้เวลาล่าช้าทำให้เกิดความต่างในความถี่ที่เปลี่ยนแปลงทันทีของสัญญาณฝั่งส่งและรับ ยิ่งระยะถึงเป้าหมายไกลขึ้นค่าความต่างของความถี่ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น โดยการผสมสัญญาณส่งและรับจะทำให้เกิดความถี่บีต f_b (Hz) ที่สามารถพบได้ในระบบเชิงเส้น ซึ่งเท่ากับความต่างระหว่างสัญญาณส่งและรับดังสมการที่ 2.6

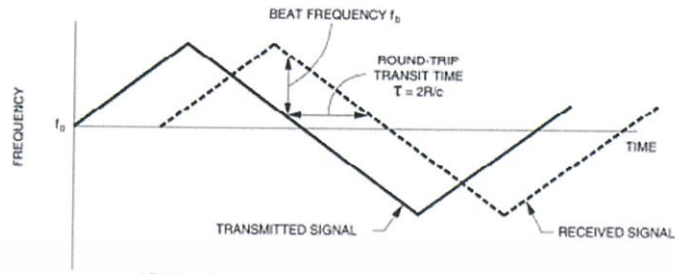
ดังนั้นในเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ซึ่งมีการมอดูเลตแบบเชิงเส้นซึ่งถูกป้อนโดยสัญญาณรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ในปริภูมิพหุนิพจน์นี้เลือกใช้สัญญาณรูปแบบสามเหลี่ยมดัง

แสดงในรูปที่ 2.13a ที่เกิดจากวงจรภาคกำเนิด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับในเชิงความถี่เทียบกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.13b ส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับจึงมีค่าคงที่ยกเว้นช่วงที่เป็นการเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.13c

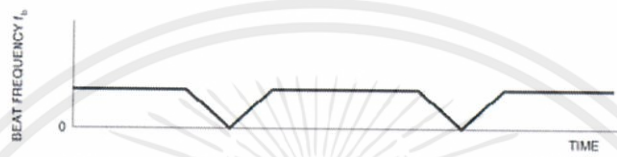


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตสัญญาณส่งและสัญญาณรับ

เมื่อระยะของเป้าหมายเพิ่มขึ้นเวลาล่าช้า τ ที่สัญญาณใช้เดินทางไป - กลับก็จะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14a ส่งผลให้ส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14b



a) Relationship between the transmitted and received signal frequencies.



b) Beat frequency

รูปที่ 2.14 เวลาล่าช้าจากการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยม

สามารถแสดงความถี่ของสัญญาณที่จะถูกส่งได้ดังสมการที่ 2.27

$$f(t) = f_c \pm \frac{B}{T}t, \quad 0 < t < T \tag{2.27}$$

โดย f_c (Hz) คือ ความถี่กลางหรือความถี่เริ่มต้นที่ใช้ในสัญญาณส่ง

B (Hz) คือ แบนด์วิดท์การมอดูเลต

T (s) คือ เวลาในการ sweep

โดยสัญญาณต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่นี้จะถูกขยายและแพร่กระจายไปกระทบเป้าหมาย แสดงได้ดังสมการที่ 2.28

$$x_r(t) = A \cos(2\pi(f_c + \frac{B}{T}t)t + \phi) \tag{2.28}$$

โดย ϕ (rad) คือ เฟส

สัญญาณที่ส่งจะสะท้อนจากเป้าหมายแล้วกระจายก่อนจะถูกเก็บรวบรวมโดยสายอากาศฝั่งรับ เวลาเดินทางกลับไปจากสายอากาศฝั่งส่งไปยังเป้าหมายที่ระยะ R และกลับไปที่ยังสายอากาศฝั่งรับจะล่าช้าเป็นเวลา τ สัญญาณที่สายอากาศฝั่งรับจึงเป็นสัญญาณเดิมที่มีค่าเวลาล่าช้าก่อนจะถูกขยาย

$$x_r(t) = x_t(t - \tau) = A \cos(2\pi(f_c + \frac{B}{T})(t - \tau)) + \phi \quad (2.29)$$

และป้อนเข้าในพอร์ต RF ของ mixer ส่วนหนึ่งของสัญญาณจากฝั่งส่งจะถูกแยกออกไปเป็นพอร์ต LO ของ mixer ซึ่งจะเป็นการเก็บสัญญาณเดิมไว้ใน mixer และทำให้วงจรฝั่งส่งและฝั่งรับสัญญาณมีเฟสตรงกันเพื่อให้ $x_r(t)$ คูณด้วย $x_t(t)$ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับจะถูกขยายและกรองโดยวงจร video amplifier (โดยไม่คำนึงถึงขนาดสัญญาณ) จะได้เป็นสัญญาณ video $v(t) = x_t(t)x_r(t)$ ได้เป็นสัญญาณสุดท้ายซึ่งจากสมบัติตรีโกณ $\cos A \cos B = (\cos(A + B) + \cos(A - B)) / 2$ จะเลือกเฉพาะเทอม $\cos(A - B)$ ของสัญญาณ $v(t)$ เพราะส่วนความถี่สูงที่เกิดจากการคูณนี้จะถูกละเว้นไม่นำมาประมวลผลเนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตจะผ่านวงจร Video Amplifier ที่มีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตของ Video Amplifier เป็นสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ ที่มีความถี่ในย่านความถี่เสียงทำให้สามารถผ่านเข้า Sound Card ของพอร์ตคอมพิวเตอร์เพื่อความง่ายต่อการประมวลผล ก่อนนำไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ได้ดังสมการที่ 2.30

$$v(t) = A \cos(2\pi(\frac{B}{T} \tau t + f_c \tau - \frac{B}{2T} \tau^2) + \phi) \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.30 ส่วนความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.31

$$f(R) = \frac{B\tau}{T} = \frac{2BR}{cT} \quad (2.31)$$

ตอนนี้สัญญาณขึ้นอยู่กับค่าความล่าช้า τ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประมาณค่าระยะ R จากส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับหรือเรียกได้ว่าเป็นส่วนความถี่ปิด โดยยิ่งเป้าหมายอยู่ไกลเท่าไรส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับจากสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ ก็จะยิ่งมีค่ามาก ถ้ามีหลายเป้าหมายในสัญญาณที่ตรวจจับได้ ก็

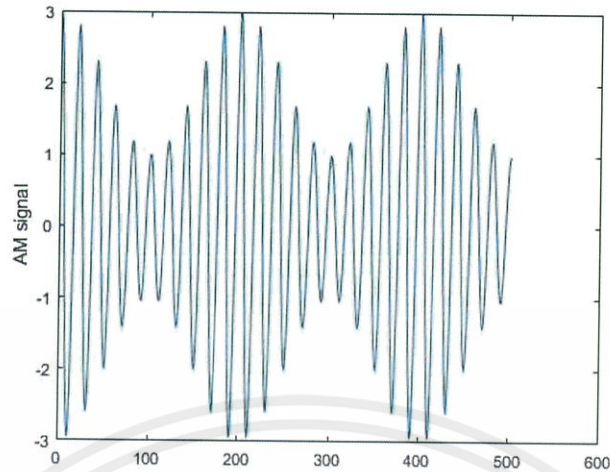
จะเกิดเป็น superposition ของส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับที่แอมพลิจูดต่างๆแทนแต่ละเป้าหมาย

จะสามารถบอกตำแหน่งหรือระยะจากรีตอร์ถึงเป้าหมายจากค่ากำลังของสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ จากวงจร Video Amplifier โดยการนำสัญญาณวิดีโอไปวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางความถี่โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางฟูเรียร์ซึ่งถูกใช้กับช่วงของสัญญาณเพื่อนำไปแสดงผลโดย spectrogram โดยการพล็อตกราฟ Range Time Intensity (RTI) เทียบกับเวลาและระยะสูงสุดที่สามารถตรวจจับเป้าหมายได้จากสมการที่ 2.24 ทำให้ตำแหน่งที่มีค่าความเข้มหรือกำลังของข้อมูลหลังจากผ่านการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลสูงกว่าตำแหน่งรอบข้างคือตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายเมื่อเวลานั้น

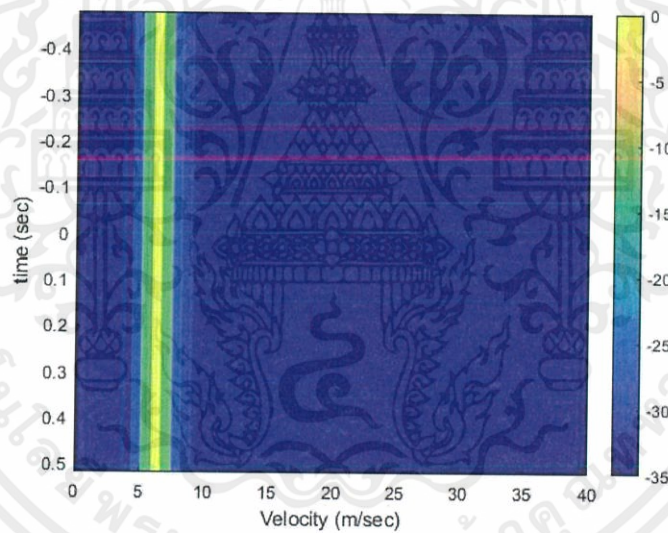
- Spectrogram

สเปกโตรแกรมเป็นภาพที่แสดงถึงสเปกตรัมของความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันไปตามเวลาซึ่งในปริภูมิพิกัดนี้จะหมายถึงสเปกตรัมของสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ จากระบบเรดาร์ที่ผ่านการแปลงฟูเรียร์แล้ว ซึ่ง สเปกโตรแกรม ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านดนตรี, โซนาร์, เรดาร์, และการประมวลผลคำพูด, การศึกษาเกี่ยวกับแผ่นดินไหวและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องและอื่นๆ โดยสามารถใช้ สเปกโตรแกรม ของเสียงเพื่อระบุคำที่ใช้พูดและออกเสียงวิเคราะห์สัตว์ต่าง ๆ โดยเมื่อนำไปใช้กับสัญญาณเสียงบางครั้ง สเปกโตรแกรม จะเรียกว่า sonographs, voiceprints หรือ voicegrams

สำหรับการอ่านสเปกโตรแกรมซึ่งตามหลักการแล้วเป็นกราฟสองมิติโดยมีมิติที่สามแสดงด้วยสี จากรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นสัญญาณ AM ที่มีค่าแอมพลิจูดของสัญญาณไม่เท่ากันเป็นอินพุตของสเปกโตรแกรมแสดงค่าเวลากับความเร็ว โดยแสดงเป็นสเปกโตรแกรมดังรูปที่ 2.16 การอ่านค่าเวลาจะอ่านจากบนลงล่างตามแกนแนวตั้ง แกนแนวนอนแสดงระยะทางจากหน้าเรดาร์ (0 m) ถึงช่วงระยะสูงสุด พลังงานหรือแอมพลิจูดของความถี่ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งที่ระยะต่างๆในแกนนอนจะถูกแสดงด้วยมิติที่สามซึ่งคือสี สีน้ำเงินเข้มจะสัมพันธ์กับแอมพลิจูดต่ำและสีที่สว่างขึ้น (สีเหลือง) จะสัมพันธ์กับแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นหรือพลังงานของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งหากดูในรูปที่ 2.16 จะสังเกตเห็นว่ามีส่วนของสัญญาณที่แสดงในสเปกตรัม โดยส่วนที่มีแอมพลิจูดสูงสุดจะแสดงเป็นสีเหลือง และส่วนที่มีแอมพลิจูดต่ำลงมาจะแสดงเป็นสีที่เปลี่ยนไปตามแถบสีด้านข้างเป็นสีเหลืองอ่อน สีเขียวและสีฟ้าตามลำดับค่าพลังงานของสัญญาณ และส่วนที่ไม่มีค่าจึงแสดงเป็นสีน้ำเงิน ติความได้ว่าสัญญาณอินพุตแสดงถึงค่าความเร็วคงที่ตลอดระยะเวลาของสัญญาณประมาณ 6 – 7 m/s



รูปที่ 2.15 สัญญาณ AM ที่เป็นอินพุตในการแสดงสเปกโตรแกรม



รูปที่ 2.16 สเปกโตรแกรมแสดงความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่

- การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน (Coherent Change Detection (CCD)) จากสัญญาณวิดีโอ $v(t)$

เนื่องจากเรดาร์แบบ Phase Coherent ที่อาศัยการทำงานของ VCO (เครื่องกำเนิดความถี่แบบที่ใช้แรงดันไปควบคุม) ส่วนใหญ่มีความเสถียรจากการใช้สัญญาณส่งแบบ chirp-to-chirp การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันหรือ CCD สามารถนำมาใช้เพื่อลบเป้าหมายที่ไม่

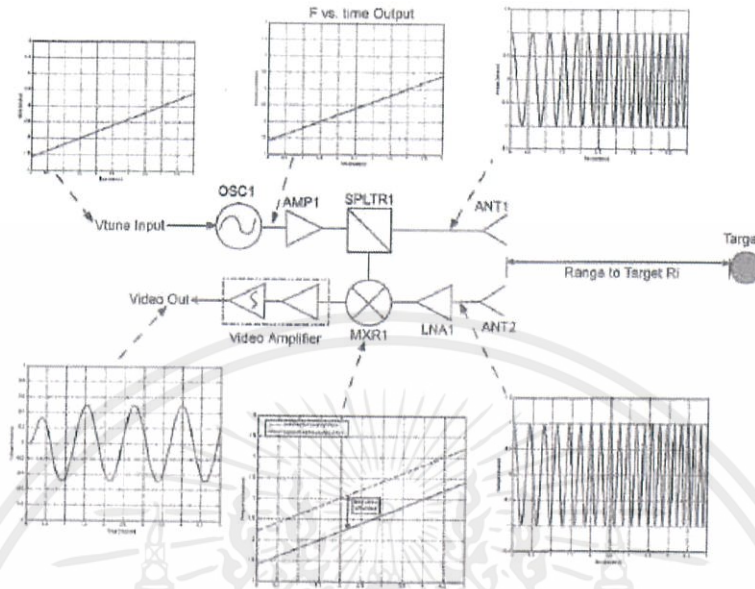
เคลื่อนที่ออกจากกลุ่มเป้าหมายที่เคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยพื้นฐานของการกวาดสัญญาณ sweep-by-sweep (หรือพัลส์ต่อพัลส์ขึ้นอยู่กับว่าต้องการจะเรียกแบบไหน) ซึ่งสัญญาณก่อนหน้าที่ไม่มีการ chirp $v(t-1)$ จะถูกลบออกจากสัญญาณ ณ เวลาปัจจุบันที่ไม่มีการ chirp $v(t)$ ทำให้ข้อมูล de-chirp คงเหลือเฉพาะเป้าหมายที่มีการย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งไปแล้วนับตั้งแต่พัลส์ก่อนหน้าดังสมการที่ 2.31

$$v(\text{changed}) = v(t) - v(t-1) \quad (2.32)$$

ระยะที่เป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงหรือย้ายตำแหน่งสามารถพบได้โดยการพล็อตผลลัพธ์จากการแปลงฟูเรียร์ สัญญาณที่ผ่านการ CCD แล้ว เรียกว่าผ่านการกำจัด clutter ซึ่งหมายถึงสัญญาณสะท้อนที่ไม่ต้องการหรือในที่นี้จะหมายถึงสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุหยุดนิ่งซึ่งจะรบกวนการทดสอบระยะจริงของเป้าหมายเคลื่อนที่ที่ต้องการตรวจจับระยะ

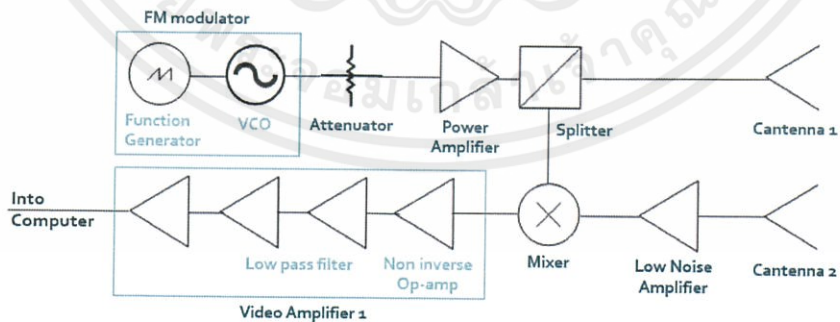
2.5.2 สถาปัตยกรรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ ถือเป็นวิธีแก้ปัญหาสำหรับการออกแบบเรดาร์กำหนดระยะทางไกลแบบแบนด์กว้างเนื่องจากตัวเรดาร์ไม่ต้องอาศัยการส่งแบบพัลส์เพราะมีการส่งและรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้สามารถตรวจจับระยะทางไกลๆของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางฟูเรียร์ซึ่งช่วยเพิ่มความไวของระบบ เรดาร์สามารถสร้างได้ด้วยอุปกรณ์ราคาไม่แพงและมีสถาปัตยกรรมแบบ Linear Coherent ซึ่งไม่ต่างจากเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.17 [1] ต่างกันเพียงการให้สัญญาณอินพุตของเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุมเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อเป็นการมอดูเลตทางความถี่ เรดาร์ชนิดนี้จะให้ข้อมูลแอนะล็อกซึ่งจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อกำหนดระยะจากเรดาร์ถึงวัตถุเป้าหมาย



รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์ คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่แบบ Linear Coherent

บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่จะแสดงในรูปที่ 2.18 คล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องต่างกันเพียงอินพุตแรงดันไฟฟ้าเข้า (Vtune) ของ VCO หรือเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุมเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรถ่ายสัญญาณหรือ Function Generator ทำให้ผลลัพธ์ของ VCO เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามเวลาถือเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

Cantenna1 ถือเป็นสายอากาศแบบท่อนำคลื่นทรงกระบอก สร้างจากกระป๋องอลูมิเนียมขนาดเล็ก และมีความสามารถในกระจายสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ประมาณ 2.26 GHz ถึงประมาณ 2.59 GHz โดยมีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 14.54 dBi และค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณ 64 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบ

สัญญาณนี้จะแพร่กระจายผ่านอากาศกระจายออกไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับไปยังเรดาร์ซึ่งส่วนหนึ่งจะรับสัญญาณผ่านเข้ามาจาก Cantenna2 ดังนั้นสัญญาณที่รับได้โดย Cantenna2 จึงเป็นสัญญาณที่ล่าช้าของสัญญาณเดิมที่ส่งไป หลังจากนั้นสัญญาณจาก Cantenna2 จะถูกขยายโดยเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) แล้วจึงป้อนเข้าไปในพอร์ต RF ของ Mixer โดยในส่วนพอร์ต LO (Local Oscillator) ของเครื่องผสมสัญญาณ (Mixer) จะถูกป้อนสัญญาณจาก Splitter เป็นส่วนของสัญญาณฝั่งส่งที่ถูกแยกมาเก็บไว้ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจาก Mixer จึงเป็นการคูณสองคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ของฝั่งส่งและฝั่งรับ เนื่องจากคลื่นทั้งสองเป็นสัญญาณมอดูเลตความถี่ที่มีการเพิ่มและลดความถี่ตามสัญญาณสามเหลี่ยมจาก Function Generator ความถี่ของสัญญาณจึงเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นที่สอดคล้องกัน ทำให้ระบบเรดาร์นี้เป็นแบบ Linear Coherent

พิจารณาการเปลี่ยนความถี่ต่อหน่วยเวลาของสัญญาณส่งกับสัญญาณที่รับได้เมื่อพล็อตเทียบกันในแกนเวลาจะพบว่ามีความถี่ offset คงที่ระหว่างทั้งสองสัญญาณ offset ความถี่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างคงที่นี้จะแปรผันตรงกับระยะของเป้าหมายและยิ่งค่าความถี่ offset นี้เพิ่มขึ้น ระยะไปถึงเป้าหมายก็เพิ่มขึ้นด้วย

หลังจากสัญญาณคูณกันภายใน Mixer แล้วจะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณวิดีโอ $v(t)$ (ซึ่งผ่านการขยาย และกรองความถี่ต่ำผ่านโดยวงจร Video Amplifier) เป็นส่วนต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณส่งกับความถี่ของสัญญาณรับซึ่งหากมีหลายเป้าหมายก็จะมีหลายส่วนต่างความถี่ ทำให้มีการซ้อนทับกันของสัญญาณวิดีโอแต่ละค่าความถี่ offset ในสัญญาณวิดีโอนี้จะแสดงถึงค่าระยะเฟส และขนาดสัญญาณที่กระจาย จึงต้องใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ในการหาระยะถึงเป้าหมาย โดยการวิเคราะห์หาค่าประกอบความถี่ของสัญญาณ

2.6 ทฤษฎีสายอากาศการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.1 รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation)

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าคือการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ซึ่งเป็นการสั่นประสานของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศด้วยความเร็วแสง การสั่นของสนามทั้งสองนี้ตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางของการแผ่พลังงานและคลื่น ทำให้เกิดคลื่นตามขวาง แนวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากแหล่งกำเนิดจุด เช่น หลอดไฟ เป็นทรงกลม ตำแหน่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจำแนกลักษณะได้โดยความถี่ของการสั่นหรือความยาวคลื่น สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้ามีคลื่นวิทยุ

ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสงที่มองเห็นได้ รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา โดยเรียงความถี่จากน้อยไปมากและความยาวคลื่นจากมากไปน้อย



รูปที่ 2.19 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.2 Near Field และ Far Field

ณ ตำแหน่งใกล้กับสายอากาศ เส้นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีการโค้งงอเนื่องจากองค์ประกอบทางเรขาคณิตของสายอากาศ ความโค้งงอของหน้าคลื่นจึงถือเป็นสนามที่แพร่กระจายออกไปจากสายอากาศเป็นรูปทรงกลม เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไกลจากสายอากาศมากขึ้น สนามจะกลายเป็นพื้นผิวที่เรียบมากขึ้นเช่นเดียวกับพื้นผิวของพื้นโลกดูเหมือนว่าจะแบนอยู่ที่ระดับพื้นดิน ที่ประมาณระยะทาง $R = 2D^2/\lambda$ (โดยที่ D เป็นขนาดมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ โดยในที่นี้ D คือความยาวด้านที่มากที่สุดของสายอากาศ) สนามที่แผ่กระจายออกมาจะถือว่าเป็นคลื่นระนาบ

เมื่อสังเกตคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะถือว่าอยู่ในระยะ Far Field เมื่อ $R > 2D^2/\lambda$ และระยะ Near Field เมื่อ $R < 2D^2/\lambda$ ใน Far Field เส้นสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแกน X และสนามแม่เหล็กมีช่วงเวลาที่เหมาะสมตามความถี่ของการสั่นในแกน Y สำหรับการแพร่กระจายออกไปด้านนอกในทิศทาง Z จากสายอากาศที่ความเร็ว c ในสุญญากาศโดยสายอากาศส่วนมากมักจะประพุดิตัวเชิงไฟฟ้า ทำให้ระยะที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศและเป้าหมายควรอยู่ในช่วง Far Field

2.6.3 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของสายอากาศเชิงเส้นหมายถึงการสัมผัสกับเส้นสนามไฟฟ้า ในที่นี้เส้นแนวนอนอยู่ในแกน Y ส่วนประกอบสายอากาศจะตั้งอยู่ในแกน X และการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในแกน Z ทิศทางออกจากสายอากาศตามปกติสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนั้น

สายอากาศแบบไดโพลนี้จึงเป็นโพลาริซในแนวตั้ง สามารถทำเป็นโพลาริซเพิ่มเติมได้ เช่น โพลาริซวงรี โพลาริซวงกลม ในปริภูมิพหุนันนี้สายอากาศทั้งหมดจะมีโพลาริซแบบเชิงเส้นทั้งแนวตั้งหรือแนวนอน

2.6.4 พารามิเตอร์ที่ใช้

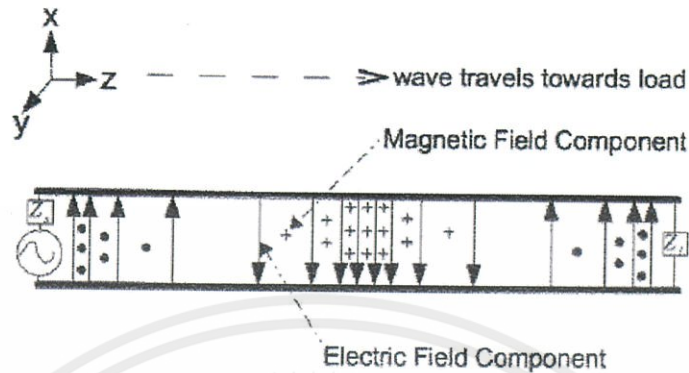
อัตราที่เส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก่อตัวและแพร่กระจายขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางที่สนามแม่เหล็กและไฟฟ้ามีการแพร่กระจายอยู่สมบัติเหล่านี้เรียกว่า Permittivity μ , Permeability ϵ และสำหรับตัวกลางที่มีการสูญเสีย Loss Tangent σ ในปริภูมิพหุนันนี้เรดาร์ส่วนใหญ่จะถูกใช้งานในสูญเขต ดังนั้นพารามิเตอร์เหล่านี้จึงเป็น $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (Farads / s), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Henries / s) และ $\sigma \approx 0$ (Siemens / s) ดังนั้นความเร็วของคลื่นคือ $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 3 \cdot 10^8 = c$ (m / s)

2.6.5 สายส่ง (Transmission Lines)

เมื่อมีการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะไม่สามารถต่อเครื่องส่งสัญญาณบนสายอากาศโดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้การส่งผ่านสัญญาณซึ่งถือเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศในที่อยู่ไกลออกไป

การส่งผ่านสัญญาณทำงานในลักษณะเดียวกันกับสายอากาศโดยมีการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด (เครื่องส่งสัญญาณหรือออสซิลเลเตอร์) แต่การส่งผ่านสัญญาณไม่ได้แผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปเหมือนสายอากาศ แต่จะทำการจำกัดขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางของตัวนำสองตัวซึ่งจะส่งสัญญาณนี้ไปยังโหลดที่เลือกไว้ไม่ว่าจะเป็นสายอากาศหรืออุปกรณ์อื่น ตัวนำทั้งสองนี้อาจเป็นการส่งผ่านสัญญาณแบบสองสาย, สายโคแอกเซียลหรือสายไมโครสตริป โดยตัวนำเหล่านี้สามารถโค้งงอตามแนวผนังตามมุมห้อง ออกจากประตูและหอสายอากาศเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณไปยังฝั่งรับได้

เมื่อออสซิลเลเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต Z_s เชื่อมต่อการส่งผ่านสัญญาณแบบสองสายในรูปที่ 2.20 โดยในส่วนท้ายของการส่งผ่านคือโหลด Z_L เมื่อแรงดันเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์เพิ่มขึ้นจะเกิดการผลึกประจุผ่านการส่งผ่านสัญญาณซึ่งก่อให้เกิดเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างกัน จากสมการของแมกซ์เวลล์ $\nabla \times E = -M - j\omega B$ จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เป็นมุมฉากกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างการส่งผ่านสัญญาณ



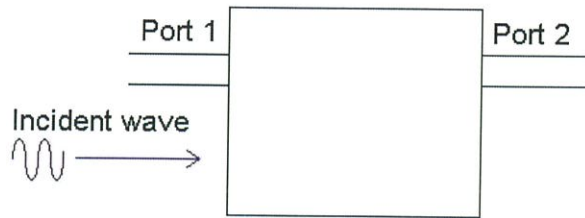
รูปที่ 2.20 การส่งผ่านสัญญาณแบบสองสายใช้ส่งสัญญาณระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลด

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ภายในการส่งผ่านสัญญาณขณะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด สายส่งสัญญาณจะมีค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัว Z_0 ซึ่งจะแปรผันตรงต่อความกว้างและคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของตัวกลางภายในตัวสาย การส่งกำลังอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อ $Z_s = Z_0 = Z_L$ มีเซื่อนั้นคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่จะถูกสะท้อนกลับไปทางแหล่งกำเนิด โดยโหลดที่ฝั่งเทอมินัลของสายส่งสัญญาณสามารถใช้เป็นตัวต้านทาน อุปกรณ์อื่น เช่น เครื่องขยายสัญญาณ, ตัวกรอง, เครื่องผสมสัญญาณ และอื่นๆ หรือสายอากาศก็ได้โดยการทดลองในปริภูมิวิทยุในปัจจุบันนี้ จะใช้การส่งผ่านสัญญาณที่มี $Z_0 = 50 \Omega$

2.6.6 Scattering Parameters

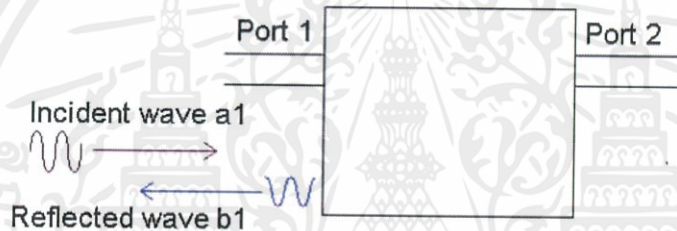
สิ่งสำคัญสำหรับการสร้างโมดูล RF คือพารามิเตอร์การกระเจิงหรือ Scattering Parameters หรือ พารามิเตอร์ S ซึ่งเป็นการทดสอบการสะท้อน (กระจัดกระจาย) กำลังส่งผ่าน ความถี่และเฟสสำหรับโมดูล RF สองพอร์ตที่กำหนด (หรืออุปกรณ์) การทดสอบ พารามิเตอร์ S จะช่วยในการแมทช์ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่กำหนดให้ได้ 50Ω (หรือความต้านทานที่ต้องการ)

สำหรับเนื้อหาในปริภูมิวิทยุฉบับนี้จะใช้ความเข้าใจขนาดของ พารามิเตอร์ S ของอุปกรณ์สองพอร์ต รูปที่ 2.21 พารามิเตอร์ S ถูกทดสอบโดยการส่งสัญญาณความถี่เดียวไปยังโครงข่ายและตรวจจับสิ่งที่คลื่นออกจากแต่ละพอร์ตโดย กำลัง แรงดันและกระแสถือได้ว่าอยู่ในรูปของคลื่นที่เดินทางทั้งสองทิศทาง



รูปที่ 2.21 อุปกรณ์สองพอร์ตและทิศทางการรับสัญญาณตกกระทบ

S_{11} หมายถึงสัญญาณสะท้อนที่พอร์ต 1 สำหรับสัญญาณตกกระทบที่พอร์ต 1 จึงสามารถเรียกได้ว่าเป็นค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 S_{11} คืออัตราส่วนของทั้งสองคลื่น $b1 / a1$

S_{21} หมายถึงสัญญาณเอาต์พุตที่พอร์ต 2 สำหรับสัญญาณตกกระทบที่พอร์ต 1 หรือเรียกได้อีกอย่างว่า Power Coupling ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 S_{21} คืออัตราส่วนของทั้งสองคลื่น $b2 / a1$

2.6.7 คุณลักษณะของสายอากาศ

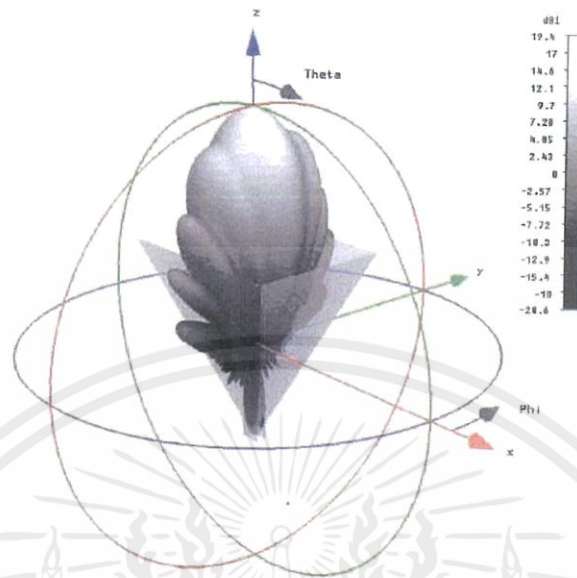
สายอากาศแบบมีทิศทาง (Direction Antennas) จะเจาะจงการแพร่กระจายสัญญาณหรือการรับสัญญาณ ไปยังทิศทางที่มีอัตราการขยายหรือค่าอัตราการขยายสูงสุดเพียงทิศทางเดียว ตัวอย่างของสายอากาศแบบมีทิศทางเช่น จานโทรทัศน์ดาวเทียม สายอากาศยาก็สายอากาศปากแตรความถี่ไมโครเวฟ ในขณะที่สายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antennas) จะมีการแพร่กระจายสัญญาณ (หรือการรับสัญญาณ) ไปยังทิศทางแนวกว้างซึ่งโดยปกติจะรวมถึงทุกสิ่งภายใน Line of Sight ตัวอย่างของสายอากาศแบบไม่มีทิศทาง (Omnidirectional) จะรวมถึงสายอากาศโดโพล, สายอากาศกระจายคลื่นวิทยุ AM / FM ในรถยนต์, สายอากาศโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

ประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรไมโครเวฟ 10 GHz จากรูปที่ 2.24 จะปรากฏขึ้นซึ่งรูปแบบจำลองของลำคลื่นหลักถูกนำไปยังแกน Z และสายอากาศตั้งอยู่บนแกน XY แสดงดังรูปที่ 2.22 อัตราการขยายของสายอากาศนั้นได้รับการพล็อตเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแพร่กระจายสัญญาณไอโซทรอปิกในอุดมคติซึ่งหมายความว่าสายอากาศนี้จะกระจายความหนาแน่นพลังงานในสัดส่วนที่มากหรือน้อยกว่าสายอากาศไอโซทรอปิกในทิศทางที่กำหนด



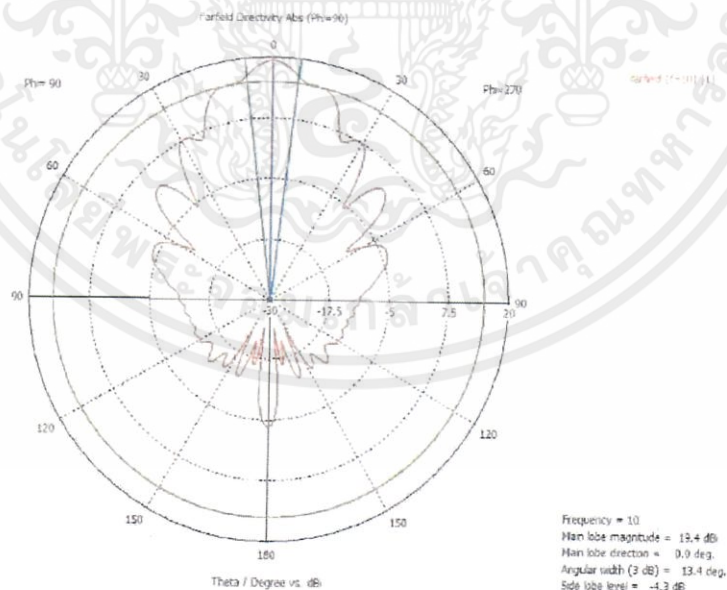
รูปที่ 2.24 สายอากาศปากแตรไมโครเวฟ 10 GHz

Half power beam width คือแบนด์วิดท์สายอากาศที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดที่ได้รับลำคลื่นหลักลดลง 3 dB จากจุดที่มีอัตราการขยายสูงสุด พิจารณารูปที่ 2.25 ตามแนวระนาบ YZ แสดงตำแหน่งของค่า -3 dB ที่ $+10.1^\circ$ และ -10.1° ซึ่งหมายความว่าสายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ซึ่งคือ ความกว้างจากจุดกำลังสูงสุดหรือตำแหน่งของ Main Lobe ที่มีกำลังลดไปครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ที่ 20.2° ในระนาบแนวนอนดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบสามมิติ

ในทำนองเดียวกันหากพิจารณารูปที่ 2.27 ตามระนาบ XZ จะแสดงตำแหน่ง -3 dB ที่ $+6.7^\circ$ และ -6.7° ซึ่งบอกได้ว่าสายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ขนาด 13.4° ในระนาบแนวตั้ง



รูปที่ 2.26 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบสองมิติในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.34)$$

โดยที่ $G = 10^{G_{dB}/10}$

2.6.8 Friis Transmission Equation

สมการการสายส่งของ Friis ประมาณการพลังงานที่ถ่ายโอนจากสายอากาศฝั่งส่งไปยังสายอากาศฝั่งรับของพลังงานอินพุตจากฝั่งส่ง โดยถูกใช้ในการประมาณประสิทธิภาพของสถานีวิทยุและสถานีวิทยุกระจายเสียง ดังสมการที่ 2.35

$$P_{rx} = P_{tx} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_{tx} G_{rx} \quad (2.35)$$

โดยที่ $P_{tx} (dB)$ คือพลังงานฝั่งส่งที่ถูกป้อนเข้าสายอากาศส่งจากเครื่องส่งสัญญาณ

$P_{rx} (dB)$ คือพลังงานที่รับเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณจากสายอากาศรับสัญญาณ

$G_{tx} (dBi)$ และ $G_{rx} (dBi)$ คืออัตราขยายส่วนฝั่งรับและส่ง

$R (m)$ คือช่วงหรือระยะทางระหว่างสองสายอากาศ

$\lambda (m)$ คือความยาวคลื่นของสัญญาณส่ง

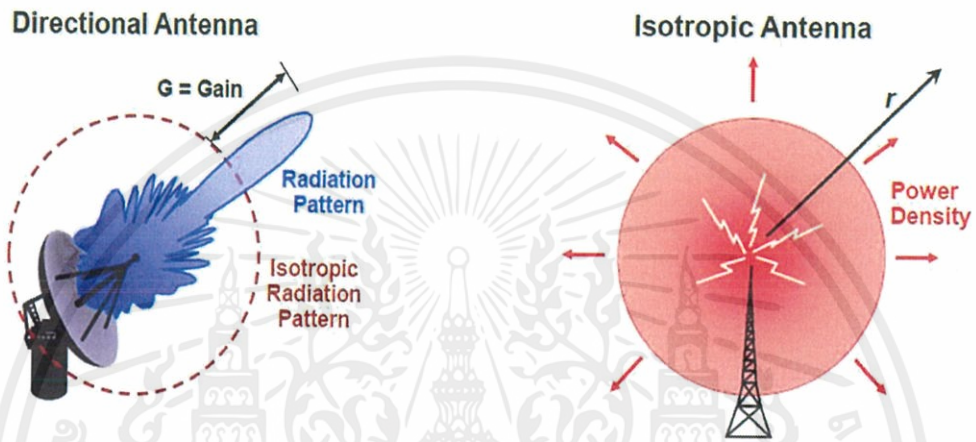
โดยการประมาณหรือทดสอบความไวของตัวรับสัญญาณ จะสามารถกำหนดและบ่อนพลังงานต่ำสุดในเครื่องรับเพื่อการสื่อสารที่เชื่อถือได้และใช้แทน P_{rx} ได้ การรู้ถึงประโยชน์ของทั้งสองอัตราขยายสายอากาศฝั่งส่งและรับ G_{tx} และ G_{rx} จะสามารถหาค่าช่วงการเชื่อมต่อหรือระยะการสื่อสารสูงสุด R ได้ โดยสมมติว่าสายอากาศทั้งสองอยู่ในระดับสายตามองเห็น (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)

2.6.9 Power Density และ อัตราการขยายของสายอากาศแบบ Isotropic และ Directional

Power density $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ หรือความหนาแน่นของพลังงานคือพลังงานของเครื่องส่ง

สัญญาณหารด้วยพื้นที่ผิวของทรงกลม ($4\pi r^2$) ที่ระยะทางนั้น พื้นที่ผิวของทรงกลมจะเพิ่มขึ้นตามรัศมีดังนั้นความหนาแน่นของพลังงาน P_D จะลดลงเมื่อระยะ r เพิ่มขึ้น โดยค่าอัตราการขยายจะสัมพันธ์กับสายอากาศ isotropic วัดได้เป็นหน่วย dBi (Decibels Relative to Isotropic Antenna) โดยสายอากาศแบบมีทิศทางจะสร้างรูปแบบการแผ่รังสีของค่าอัตราการขยาย ที่ขึ้นอยู่กับมุมมอง Aspect

สรุปได้ว่าอัตราการขยายสูงสุดและความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดจะเพิ่มขึ้นสำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional) เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบ isotropic ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 อัตราการขยายและความหนาแน่นพลังงานของสายอากาศ

2.6.10 อัตราการขยาย หรือ Gain

อัตราการขยายของสายอากาศหมายถึงความสามารถในการส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศต้นแบบเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน โดยอัตราการขยายของสายอากาศเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นการแพร่กระจายคลื่นที่ชี้ทิศทาง รวมไปถึงประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่น

อัตราการขยาย G เทียบกับ Isotropic Radiator ของสายอากาศ ที่มีอะเพอร์เจอร์ประสิทธิภาพ A_e (m^2) ดังสมการที่ 2.35

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.36)$$

Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) คือฟังก์ชันของกำลังส่ง P_t คูณกับค่าอัตราการขยายของสายอากาศฝั่งส่ง $G_t(\theta, \phi)$ คือพลังงานที่แพร่กระจายในทิศทางเดียว กล่าวคือเป็นค่าคงที่ โดยปกติสำหรับการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศถ้ามีการระบุค่า EIRP เพียงค่าเดียว ค่านี้จะเป็นค่าสูงสุดของ EIRP ของมุมที่ทดสอบได้ทั้งหมด โดย EIRP

สามารถใช้เป็นจำนวนพลังงานที่สายอากาศ isotropic จะต้องแพร่กระจายเพื่อให้ได้ค่าที่ทดสอบได้ เขียนได้ดังสมการที่ 2.37

$$EIRP(\theta, \phi) = P_t G_t(\theta, \phi) \quad (2.37)$$

จากค่า EIRP ทำให้สามารถคำนวณค่า Radiated Power Density P_d ณ ระยะ R จาก สายอากาศ ฝั่งส่งได้ เขียนได้ดังสมการที่ 2.38

$$P_d(\theta, \phi) = EIRP / 4\pi R^2 = P_t G_t(\theta, \phi) / 4\pi R^2 \quad (2.38)$$

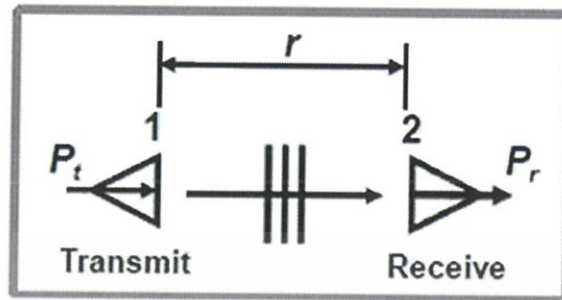
และเนื่องจากกำลังที่ได้รับ P_r คือผลคูณของความเข้มกำลังตกกระทบ P_{di} และอะเพอร์เจอร์ ประสิทธิภาพ A_e ดังสมการที่ 2.39

$$P_r = P_{di} A_e \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.37 - 2.39 ทำให้หาค่าพารามิเตอร์ S_{21} ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ S ซึ่ง จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตระหว่างพอร์ต (หรือขั้ว) หรือ เรียกอีกอย่าง หนึ่งได้ว่า Relative Power Coupled ระหว่างสายอากาศทั้งสองตัว (ฝั่งส่ง-รับ) ได้ดังสมการ ที่ 2.40

$$P_r(\theta, \phi) / P_t = G_t(\theta, \phi) G_r(\theta, \phi) \lambda^2 / (4\pi R)^2 \quad (2.40)$$

ดังนั้นจึงจะสามารถคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ ถ้าสามารถทดสอบค่า Relative Power Coupled ระหว่างสายอากาศที่เหมือนกันทุกประการสองตัวได้ ($G_t = G_r = G$) ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การทดสอบค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่เหมือนกันทุกประการ

จากสมการที่ 2.40 จะได้ตั้งสมการที่ 2.41 และ 2.42

$$P_r(\theta, \phi) / P_t = G^2 \lambda^2 / (4\pi R)^2 \quad (2.41)$$

$$G^2 = P_r(\theta, \phi) / P_t \lambda^2 (4\pi R)^2 \quad (2.42)$$

ได้ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ ตั้งสมการที่ 2.43

$$G_{abi} = \frac{1}{2} [10 \log_{10} (P_r(\theta, \phi) / P_t) + 20 \log_{10} (4\pi R / \lambda)] \quad (2.43)$$

ในการทดลองนี้จะให้ค่า R เท่ากับ 36.31 cm ซึ่งมากกว่าค่า Far Field ของสายอากาศและง่ายต่อการคำนวณ

2.6.11 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) และ VSWR

2.6.11.1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Power Transmission Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (แทนด้วยตัว Γ) ของสายอากาศบอกปริมาณการทดสอบว่ามีสัญญาณเท่าใดที่ถูกสะท้อนจากสายอากาศโดยมีค่าสัมพันธ์กับสัญญาณตกกระทบ ซึ่งควรมีลักษณะดังนี้

- ค่า $|\Gamma|$ ควรมีค่าน้อยมาก ๆ สำหรับสายอากาศที่ถูกออกแบบอย่างดี
- ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วยเดซิเบล dB ถูกเรียกอีกอย่างว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถเปลี่ยนเป็นค่า VSWR ได้ตั้งสมการที่ 2.44

$$VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|) \quad (2.44)$$

สายอากาศส่วนใหญ่จะทดสอบการสะท้อนกลับในหน่วย decibels (dB) โดยใช้ความสัมพันธ์ $10 \log_{10} |\Gamma|^2$ ได้เป็นค่าการสูญเสียย้อนกลับซึ่งถ้ามีค่าเท่ากับ -10 dB จะได้ $|\Gamma|^2 = 0.1$ และ $\Gamma^2 = 0.9$ หมายความว่า 90% ของกำลังที่ใช้ได้จะถูกส่งผ่านโดยสายอากาศ เพียง 0.5 dB ของกำลังส่งสูญหายไปจากการไม่ตรงกันระหว่างการส่งผ่านสัญญาณกับตัวสายอากาศ



รูปที่ 2.30 ทิศทางของสัญญาณตกกระทบและสัญญาณสะท้อนระหว่างการส่งผ่านและสายอากาศ

จากรูปที่ 2.30 จะได้ตั้งสมการที่ 2.45

$$R = \frac{a}{b} \quad (\text{ค่าการสูญเสียย้อนกลับ}) \quad (2.45)$$

2.6.11.2 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

VSWR หรือ (Voltage Standing Wave Ratio) คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้เป็นค่าปริมาณที่ไหลผิดไปจากสถานะที่โหลด match มากน้อยเท่าไร ตัวอย่าง เช่น $VSWR = 1$ หมายความว่าคลื่นสม่ำเสมอตลอดสาย ซึ่งเป็นสถานะที่โหลดที่ match พอดี $VSWR = \infty$ เมื่อโหลดเปิดวงจร หรือลัดวงจร

ค่า Power Transmission Coefficient $T^2 = 1 - |\Gamma|^2$ บอกปริมาณการทดสอบว่ามีค่ากำลังเท่าใดที่ถูกส่งผ่านจากสายอากาศโดยมีค่าสัมพันธ์กับกำลังตกกระทบ ซึ่งค่า T^2 สำหรับสายอากาศที่ถูกออกแบบอย่างดีควรมีค่าใกล้ 1

2.6.12 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

2.6.12.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

พลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศจะแสดงด้วยรูปแบบการ

แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นฟังก์ชันการกระจายของพลังงานคลื่นที่แพร่กระจายไปในตัวกลางตามทิศทางเทียบเป็นมุมรอบสายอากาศ โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- กำหนด Far Field
- เป็นฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง
- สามารถเป็น Field Patterns (ขนาดของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก) หรือ Power Patterns (ขนาดของสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กกำลังสอง)
- มักจะถูกทำการ Normalize โดยอิงจากค่าสูงสุดใน Pattern
- Power Pattern มักถูกพล็อตกราฟในสเกลลอการิทึมหรือโดยทั่วไปในแบบเดซิเบล

2.6.13 ท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Circular Waveguide)

ในปริภูมิโพรงนี้ สายอากาศที่ใช้มีการแพร่กระจายสัญญาณเป็นสายอากาศแบบท่อนำคลื่นทรงกระบอก โดยมีโพรบลวดโมนิโพลเป็นตัวปล่อยสัญญาณ เช่นเดียวกับกับในกรณีของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม การแพร่กระจายในท่อนำคลื่นทรงกระบอกจะถูกกำหนดโดยความถี่ตัด ซึ่งจะไม่ซ้ำกันสำหรับโหมดการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกกำหนดโดยเส้นผ่าศูนย์กลางและความถี่ตัด เป็นตัวกำหนดความถี่ที่ต่ำกว่าของช่วงความถี่ในการทำงาน ความถี่ตัดสำหรับท่อนำคลื่นทรงกระบอกคำนวณได้ดังสมการที่ 2.46

$$f_{c,m,n} = \frac{v}{2\pi} \beta_{c,m,n} \quad (2.46)$$

โดย $v(m/s)$ คือ ความเร็วคลื่นในตัวกลางของท่อนำคลื่น

$\beta_{c,m,n}$ เป็นค่าคงที่เฟสซึ่งคำนวณได้ตามสูตรที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการค่าคงที่เฟสตัดสำหรับโหมดท่อนำคลื่นทรงกระบอก

TE (H) mode (Transverse Electric)	TM (E) mode (Transverse Magnetic)
$\beta'_{c,m,n} = \frac{\chi'_{m,n}}{a}$	$\beta_{c,m,n} = \frac{\chi_{m,n}}{a}$

โดยที่

$\chi_{m,n}$ n-th root ของ m-th Bessel function

$\chi'_{m,n}$ n-th root ของ the m-th Bessel function derivative

$a(m)$ รัศมีของ ท่อนำคลื่นทรงกระบอก

ตารางที่ 2.3 ค่า Bessel functions และ Bessel derivatives

Function number m	Root number N	Roots of the Bessel Function J_m $\chi_{m,n}$	Roots of the Bessel function derivatives J'_m $\chi'_{m,n}$
0	1	2405	3832
0	2	5520	7016
0	3	8654	10173
1	1	3832	1841
1	2	7016	5331
2	1	5136	3054
2	2	8417	6706
3	1	6380	4201

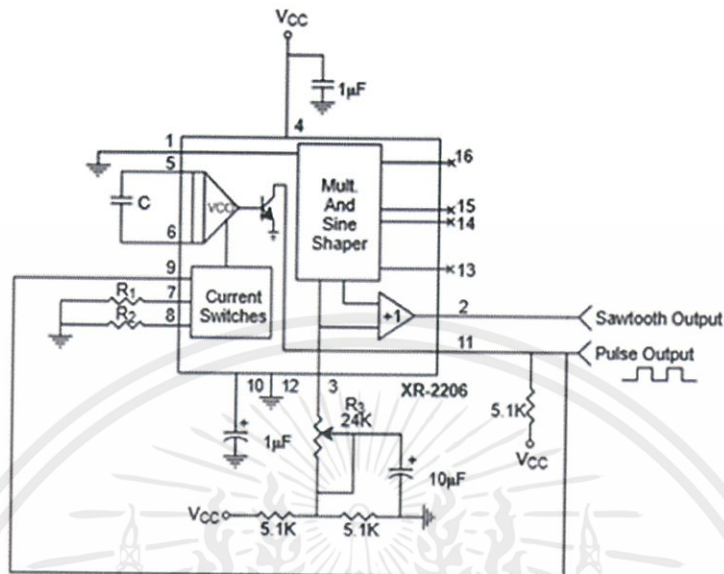
Propagation Modes ใน ท่อนำคลื่นทรงกระบอก

แต่ละโหมดของท่อนำคลื่นจะถูกแยกเป็นการกระจายคลื่นในทางขวางและทางยาวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โหมดในกรณีของท่อนำคลื่นทรงกระบอกเหมือนกันกับในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม คือ TE และ TM ซึ่งจะอธิบายได้ด้วยดัชนี m และ n ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามในแนวรัศมีและแนวแกนทิศทางตามลำดับ โดยในกรณีของท่อนำคลื่นทรงกระบอก โหมดพื้นฐานจะเป็น TE_{11} และมีค่า $\chi'_{11} = 1841$

2.7 ทฤษฎีวงจรกำเนิดสัญญาณและ วิดีโอ Amplifier

2.7.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมในปริภูมิพหุนามนี้เลือกใช้ IC เบอร์ XR - 2206 มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.31 สัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรนี้จะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่สามารถปรับคาบเวลา และแรงดันของเอาต์พุตได้



รูปที่ 2.31 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 2.31 XR - 2206 ทำงานได้โดยใช้ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 เชื่อมต่อกับขา 7 และขา 8 ถ้าขา 9 ทำการ open-circuit หรือ เชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าที่มี offset 2 โวลต์ จะมีการใช้งาน R_1 เท่านั้น ในทำนองเดียวกัน ถ้าระดับแรงดันที่ขา 9 เท่ากับ 1 โวลต์ จะมีการใช้งาน R_2 เท่านั้น

เมื่อใส่ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ขา 7 จะสามารถปรับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมได้ และเมื่อใส่ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ขา 3 จะสามารถปรับแรงดันของสัญญาณสามเหลี่ยมได้ และสัญญาณเอาต์พุตสามารถทดสอบได้จากขา 2 ของ XR - 2206

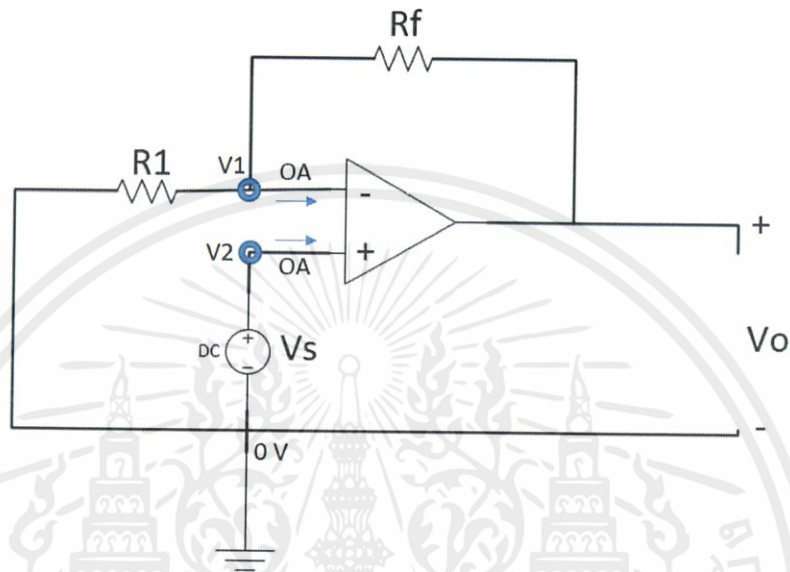
ในการประมวลผลสัญญาณคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่จะมีการใช้สัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นเอาต์พุตจากขา 11 ในการคำนวณค่าเวลาในการทดลองด้วย ซึ่งจะมีการกล่าวถึงในส่วนการ

2.7.2 วงจร Video Amplifier

ในส่วนของวงจร Video Amplifier ซึ่งเป็นวงจรที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณวิดีโอที่ประกอบด้วยสัญญาณแอนะล็อกมากกว่าหนึ่งช่อง โดยสามารถถูกแสดงเป็นข้อมูลภาพหรือวิดีโอบนจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ได้ จะประกอบไปด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสและวงจรกรองความถี่ต่ำ

2.7.2.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรถ่ายแบบไม่กลับเฟสมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างวงจรถ่ายแบบไม่กลับเฟส

วงจรถ่ายแบบไม่กลับเฟส จะมีเฟสเดียวกันกับอินพุตที่เข้ามา โดยที่ขาอินพุตจะถูกป้อนเข้าทางอินพุตบวกดังสมการที่ 2.47 แต่ R_f ก็ยังคงต้องเข้าทางอินพุตลบ ดังรูปที่ 2.32 ที่โหนด v_1

$$i_1 = i_2 \rightarrow \frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f} \quad (2.47)$$

แต่ $v_2 = v_1 = v_s$ จะได้ดังสมการที่ 2.48

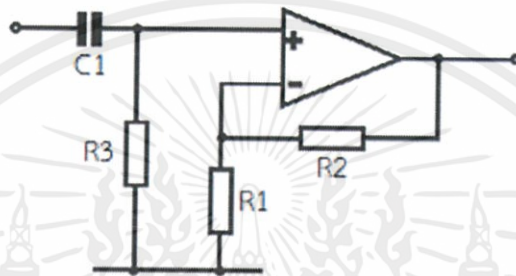
$$-\frac{v_s}{R_1} = \frac{v_s - v_o}{R_f} \quad (2.48)$$

นั่นคือ อัตราการขยาย A_v สำหรับวงจรถ่ายแบบไม่กลับเฟส จะได้ดังสมการที่ 2.49

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (2.49)$$

2.7.2.2 AC Coupling สำหรับวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

AC Coupling สำหรับวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่มี AC Coupling

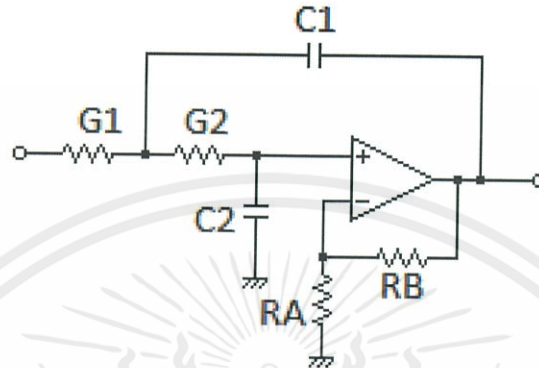
โดยชุด RC (C_1 กับ R_3) ที่ต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรตามรูปที่ 2.33 จะทำหน้าที่ Coupling สัญญาณไฟตรง ลง ground เพื่อป้องกันไม่ให้มีองค์ประกอบสัญญาณไฟตรงผ่านเข้าไปในส่วนวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

ค่าของ R_3 โดยปกติควรมีค่ามาก เช่น 100 k Ω หรือมากกว่า ทั้งนี้มีข้อสังเกตคือ C_1 กับ R_3 ที่ต่อกันในลักษณะนี้จะรวมตัวกันเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ 1st order ที่มีความถี่ตัด ดังนั้นควรต้องพิจารณาเรื่องการเลือกค่า C_1 เพื่อระวังเรื่องตำแหน่งจุดตัดที่จะเกิดขึ้น (หมายเหตุ : โดยปกติตำแหน่งจุดตัดจะเกิดขึ้นที่ความถี่ซึ่งค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน)

2.7.2.3 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key เป็นรูปแบบวงจร (Topology) ที่นิยมใช้นำมาทำการสร้างเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (LPF: Low Pass Filter) และ วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน (HPF: High Pass Filter) ในปริญญานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีการออกแบบวงจร LPF เพียงเท่านั้น

1) โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้โครงสร้าง
วงจรแบบ Sallen-Key



รูปที่ 2.34 โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key ที่
อัตราการขยายไฟตรง $H = K$

จากรูปที่ 2.34 ซึ่งเป็นรูปแบบของวงจร Sallen-Key LPF ชนิดที่ให้ค่าอัตราการขยาย
ไฟตรงเป็นค่าคงที่ $H = K$ โดยที่ไม่สามารถทำการควบคุมค่าอัตราการขยายไฟตรงได้โดยตรงจาก
วงจร ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.49

$$T(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{KG_1G_2 \frac{1}{1+K/A}}{s^2C_1C_2 + s \left[C_2(G_1+G_2) + C_1G_2 \left(1 - K \frac{1}{1+K/A} \right) \right] + G_1G_2} \quad (2.50)$$

ในกรณีที่เราคาดเดาว่า Op-Amp ที่ใช้งานเป็นกรณีอุดมคติ กล่าวคืออัตราการขยาย
Open-loop ของ Op-Amp $A = \infty$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.50 จะได้ดังสมการที่ 2.51

$$T(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{KG_1G_2}{s^2C_1C_2 + s \left[C_2(G_1+G_2) + C_1G_2(1-K) \right] + G_1G_2} \quad (2.51)$$

เพื่อความสะดวกในการพิจารณา กำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ จะได้ดังสมการที่ 2.52

$$T(s) = \frac{KG_1G_2/C^2}{s^2 + s[G_1 + G_2(2-K)]/C + G_1G_2/C^2} = \frac{H\omega_0^2}{s^2 + s\omega_0/Q + \omega_0^2} \quad (2.52)$$

โดยสมการด้านขวามือสุดในสมการที่ 2.51 เป็นรูปแบบมาตรฐานของ 2nd order circuit ซึ่งนำมาใช้ในการเปรียบเทียบสำหรับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบในการใช้งาน และจากสมการที่ 2.51 จะนำไปสู่พารามิเตอร์ตัวกรองที่แสดงในเทอมของส่วนประกอบดังสมการที่ 2.53, 2.54 และ 2.55

$$\omega_0^2 = \frac{G_1G_2}{C^2} \quad (2.53)$$

$$Q = \frac{\sqrt{G_1G_2}}{G_1 + G_2(2-K)} \quad (2.54)$$

$$H = K > 1 \quad (2.55)$$

ซึ่งทั้ง 4 องค์ประกอบ คือ C, G_1, G_2 และ K ใช้ในการวิเคราะห์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ตัวกรองดังกล่าว ทั้งนี้ค่า K มีค่าดังสมการที่ 2.56

$$K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \quad (2.56)$$

ในทางปฏิบัติเนื่องจากค่า C ค่อนข้างจะหาได้ยากหากไม่ทำการกำหนดเลือกขึ้นมาเป็นค่าตั้งต้น ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมเลือกค่าของ C เป็นค่าตั้งต้น และถ้าสมมุติว่าไม่ได้สนใจที่จะกำหนดหรือควบคุมค่าอัตราขยายโดยตรง คือสามารถกำหนดให้ $H = K$ ดังนั้นเราอาจจะเลือกให้ $R_1 = R_2 = R$ ($r_1 = \frac{1}{G_1}$ และ $r_2 = \frac{1}{G_2}$) ดังนั้นจากสมการที่ 2.53 - 2.56 สามารถสรุปเป็นสมการที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบต่อไปได้ดังสมการที่ 2.57

$$Q = \frac{1}{3-K} \quad (2.57)$$

ข้อสังเกตจากสมการที่ 2.57 หาก K มีค่าเข้าใกล้ 3 จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับค่า Q ซึ่งจะมีค่าสูงมาก ดังนั้น Sallen-Key จึงเป็นประโยชน์และเหมาะสมกับการออกแบบที่มีการใช้ค่า Q

ที่มีค่าน้อยๆ เท่านั้น อาทิเช่น การออกแบบวงจร LPF (หรือ HPF) แต่อาจจะไม่เหมาะกับ BPF (Tune) หรือ BSF (Notch) จะได้ดังสมการที่ 2.58

$$R = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (2.58)$$

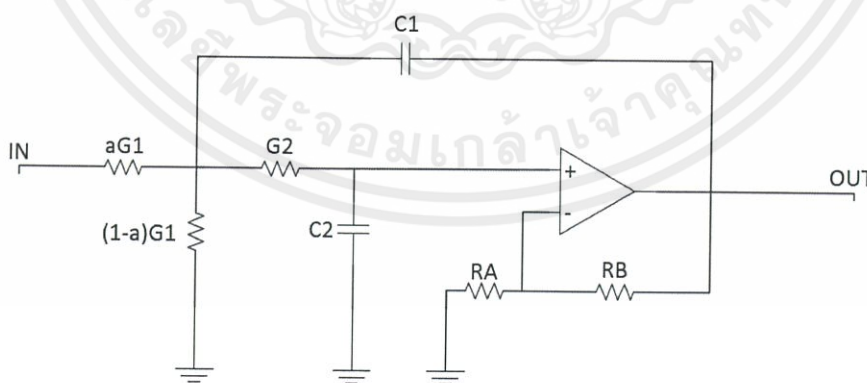
และได้ดังสมการที่ 2.59

$$R_B = (2 - \frac{1}{Q})R_A \quad (2.59)$$

โดยจากสมการที่ 2.59 เราจะทำการเลือกค่าของ R_A เป็นค่าตั้งต้น และโดยทั่วไปก็นิยมให้มีค่าเท่ากับ R ดังเช่นค่า $R_1 = R_2 = R$

2) การปรับอัตราการขยายสำหรับวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ที่ใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key

ข้อจำกัดของวงจรแบบเดิมดังแสดงในรูปที่ 1 คืออัตราการขยาย ไฟตรง จะถูกกำหนดไว้ด้วยค่า $H = K = 3 - \frac{1}{Q}$ หากจะนำ Op-Amp มาต่อเพิ่มเพื่อควบคุมอัตราการขยายก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเกินไป ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงด้วยโครงสร้างของวงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดอัตราการขยายด้วยการแบ่งแรงดัน ทั้งนี้เพื่อให้ $H < K$ ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานคือ $a < 1$ ทั้งนี้โดยให้ $R_A = \frac{R_1}{a}$ ซึ่งสัมพันธ์กับเทอม aG_1 และ $R_B = \frac{R_1}{1-a}$ ซึ่งสัมพันธ์กับเทอม $(1-a)G_1$ พิจารณาจากรูปวงจรประกอบที่แสดงดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ที่ใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key ชนิดที่การแบ่งแรงดันเพื่อควบคุมอัตราการขยาย ไฟตรง ได้ตามกำหนด

โดยมีเงื่อนไขการใช้งาน คือ $a < 1$ ซึ่งจะทำให้ได้ดังสมการที่ 2.60

$$H = aK \quad (2.60)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ตัวแปร a จะถูกใช้ในการควบคุมอัตราขยาย ไฟตรง ทั้งนี้ ฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยหลักแล้วจะไม่ได้เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร เพียงแค่มี แพกเตอร์ a เข้ามาคูณเท่านั้น ดังสมการที่ 2.61

$$T(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{aKG_1G_2}{s^2C_1C_2 + s[C_2(G_1+G_2) + C_1G_2(1-K)] + G_1G_2} \quad (2.61)$$

3) LPF with Maximally Flat Magnitude (Butterworth Low Pass Filter)

ภายใต้หัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายการนำโครงสร้างของวงจร Sallen-Key มาใช้ในการสร้าง LPF ที่อันดับใดๆ ด้วยการใช้โครงสร้างการต่อเรียง (Cascade) ของโครงสร้างอันดับ 2 ในกรณี ลำดับ คู่ หรือใช้โครงสร้างอันดับ 2 ร่วมกับอันดับ 1 ในกรณี ลำดับคี่ที่ออกแบบด้วยคุณลักษณะที่เป็น Maximally Flat Magnitude Response ซึ่งโดยทั่วไปเป็นคุณลักษณะของ Butterworth Filter ทั้งนี้จะทำการอธิบายด้วยการยกตัวอย่าง ดังนี้

ตัวอย่าง จงออกแบบ Maximally Flat Magnitude Response ที่มีข้อกำหนด ดังนี้

$$\alpha_{\max} = 0.5 \text{ dB (Attenuation ในย่าน Passband)}$$

$$\alpha_{\min} = 20 \text{ dB (Attenuation ในย่าน Stopband)}$$

$$\omega_p = 1000 \text{ rad/s (Passband Edge Frequency)}$$

$$\omega_s = 2000 \text{ rad/s (Stopband Edge Frequency)}$$

$$\text{Sol}^{\text{N}}: \text{จากสมการ } \varepsilon^2 = 10^{0.1\alpha_{\max}} - 1 \quad \text{ดังนั้น } \varepsilon^2 = 0.12202$$

$$\text{จากสมการ } n = \frac{\log \left[(10^{0.1\alpha_{\min}} - 1) / (10^{0.1\alpha_{\max}} - 1) \right]}{2 \log(\omega_s / \omega_p)} \quad \text{หลังแทนค่าเสร็จแล้วจะได้ } n = 4.83 \approx 5$$

ดังนั้นเลือกออกแบบเป็นวงจรกรองสัญญาณในอันดับที่ 5

$$\text{จากสมการ } \omega_B = \varepsilon^{-1/n} \omega_p = 0.349^{-1/5} \times 1000 = 1234.1 \text{ rad/s}$$

หมายเหตุ: ในกรณีคิด Passband Edge Frequency เป็นจุดที่เป็นตำแหน่ง -3 dB จะกำหนดให้ $\varepsilon = 1$ ซึ่งจะส่งผลให้ $\omega_b = \omega_p$

ขั้นตอนต่อไป สามารถพิจารณาจากตาราง Butterworth Polynomial ในอันดับ 5 ในรูปแบบที่เป็น Factored Form ได้ดังสมการที่ 2.62

$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{1}{(s+1)(s^2+1.6180s+1)(s^2+0.6180s+1)} = T_1(s) + T_2(s) + T_3(s) \quad (2.62)$$

โดยฟังก์ชันการถ่ายโอน ในสมการที่ 2.62 อยู่ในรูปแบบที่เป็น Normalized Transfer Function ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบจริงจะต้องมีการทำ De-normalization ด้วยการแทน $s = \frac{s}{\omega_B}$ และจากสมการที่ 2.62 หากพิจารณาเป็นค่า Q ของแต่ละส่วน สามารถพิจารณาได้ดังนี้

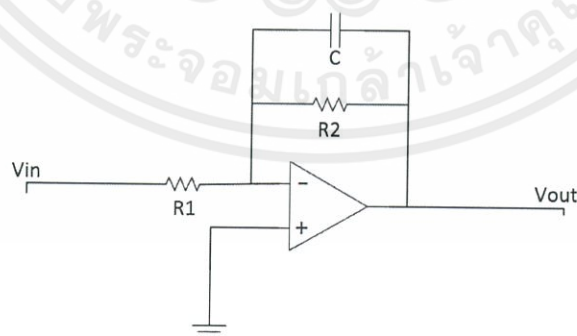
$T_1(s) \Rightarrow Q = 0.5$ (กรณี 1st order ส่วน จะมีเพียง pole 1 ตัว อยู่บนแกน real ซึ่ง $Q = 0.5$ เสมอ)

$T_2(s) \Rightarrow Q = 0.618$ (บางตาราง Butterworth จะมีการแสดงค่า Q ของแต่ละส่วน ให้ หรือพิจารณาเองได้จากการเทียบกับรูปแบบมาตรฐาน ของ 2nd order circuit ในสมการที่ 2.50)

$T_3(s) \Rightarrow Q = 1.618$

ทั้งนี้ในส่วนของ $T_1(s)$ จะทำการวิเคราะห์เป็น 1st order circuit ส่วน $T_2(s)$ และ $T_3(s)$ จะทำการวิเคราะห์โดยโครงสร้างของ Sallen-Key แบบที่มีการแบ่งแรงดัน (voltage divider)

กรณี $T_1(s)$: ใช้ Topology ดังนี้



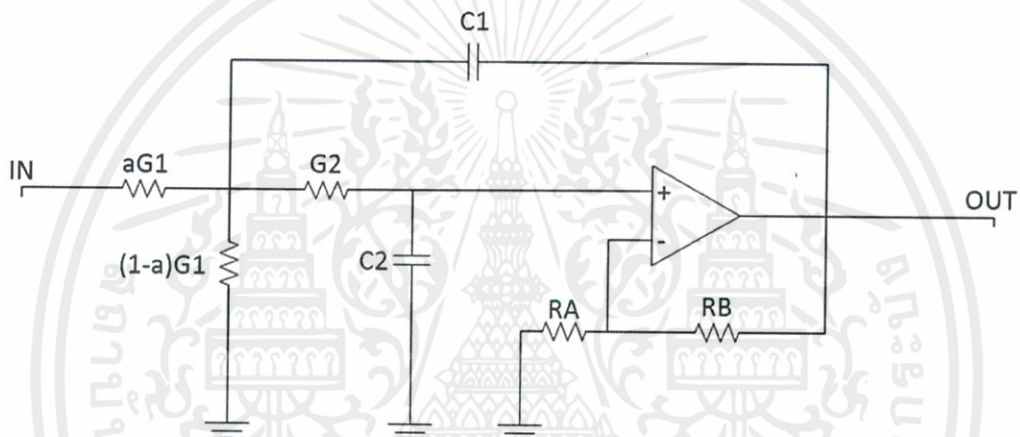
รูปที่ 2.36 วงจร Sallen-Key ลำดับที่ 1

$$\text{ซึ่ง } T_1(s) = \frac{G_1/C}{s + G_1/C} = \frac{1}{s+1} \Rightarrow G_1 = G_2$$

สมมติเลือก $C = 0.1 \mu F$, $\omega_b = 1234.1 \text{ rad/s}$

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\omega_b C} = 8103 = 8.103 \text{ k}\Omega$$

กรณี $T_2(s)$ & $T_3(s)$: ใช้ Topology ดังนี้



รูปที่ 2.37 วงจร Sallen-Key ลำดับ 2 และ 3

$$\text{โดย } T(s) = \frac{aKG_1G_2}{s^2C_1C_2 + s[C_2(G_1+G_2) + C_1G_2(1-K)] + G_1G_2} = \frac{aK\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

ซึ่งเทอมขวาสุดของสมการด้านบนเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการเท่ากับรูปแบบมาตรฐานของ 2nd order circuit

$$\text{เลือกให้ } C_1 = C_2 = C \text{ และ } G_1 = G_2 = G = \frac{1}{R}$$

$$\text{โดย } \omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ และ } Q = \frac{1}{3-K} \text{ ดังนั้นจะได้}$$

$$T_2(s) = \frac{aK\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{1}{s^2 + 0.6180s + 1}$$

สมมุติเลือก $C = 0.1 \mu F$, $\omega_B = 1234.1 \text{ rad/s}$

จะได้ $R = \frac{1}{\omega_B C} = 8.103 \text{ k}\Omega$

$$K = 3 - Q^{-1} = 3 - \frac{1}{Q} = 3 - \frac{1}{0.618} = 1.382$$

$$a = \frac{1}{K} = 0.724$$

$$T_3(s) = \frac{aK\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{1}{s^2 + 1.6180s + 1}$$

จะได้ $R = \frac{1}{\omega_B C} = 8.103 \text{ k}\Omega$

$$K = 3 - Q^{-1} = 2.382$$

$$a = \frac{1}{K} = 0.42$$

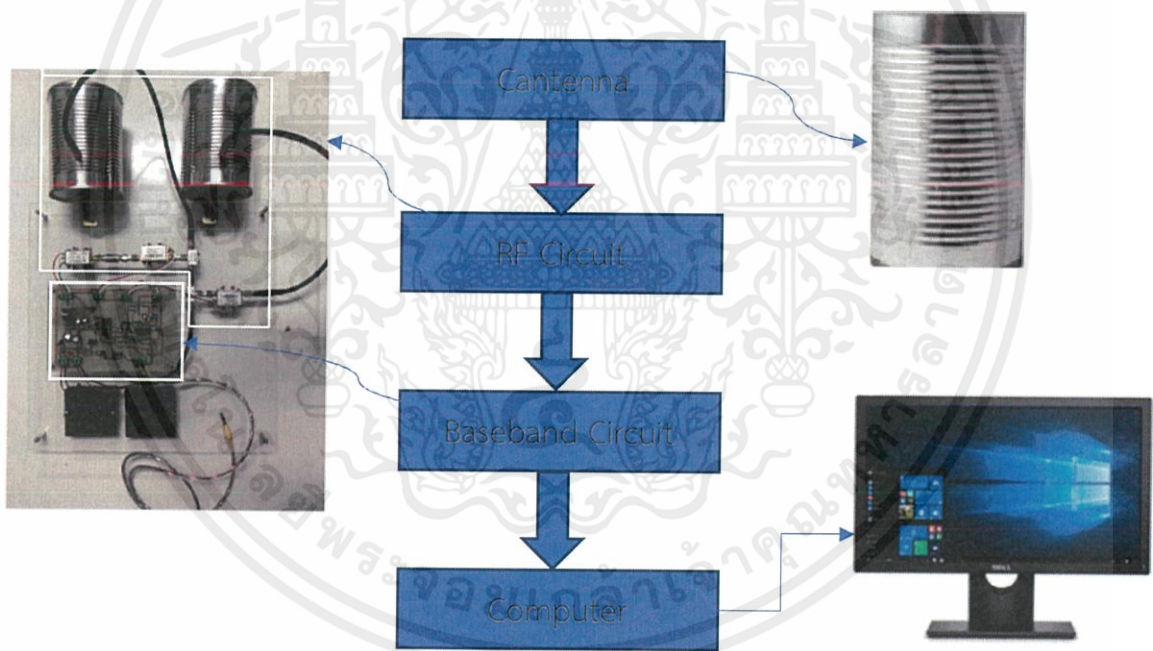
บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบเรดาร์ซึ่งตัวระบบมีการแบ่งเป็นส่วนการทำงานฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยส่วนฮาร์ดแวร์จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนสายอากาศกระป๋อง ส่วนวงจร RF และส่วนวงจร Baseband ในส่วนซอฟต์แวร์มีการแบ่งเป็น 2 โหมดการทำงานคือโหมดคลื่นต่อเนื่อง และโหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเรดาร์และการออกแบบการดำเนินการเก็บผลการทดลองของระบบ

3.1 การสร้างระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

หลักการทำงานในระบบฮาร์ดแวร์ เป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานในระบบฮาร์ดแวร์

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าระบบฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย ส่วนสายอากาศ (กระป๋อง), ส่วนวงจร RF Radar, ส่วนวงจร Baseband ซึ่งประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier ที่ประกอบไปด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจร Non - inverting Amplifier

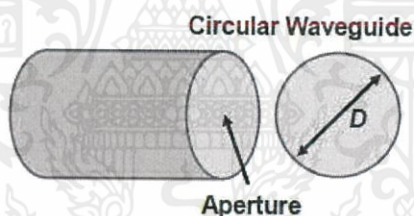
3.1.1 การออกแบบสายอากาศฝั่งรับและส่ง

ในการจัดทำสายอากาศสำหรับปริภูมิวิทยุนี้ เป็นการใช้โพรบ (Probe) แบบโมนโพลิติดตั้งในกระป่องท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Circular Waveguide) โหมดการทำงาน TE_{11} โดยได้เลือกใช้กระป่องอลูมิเนียมเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นทรงกระบอก และมีการคำนวณระยะวางสายอากาศในท่อและขนาดของสายอากาศดังนี้

3.1.1.1 จากสมการความยาวคลื่น cut off ของ โหมด TE_{11} $\lambda_c = 1.705D$ (โดย D คือระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง) ต้องเลือกกระป่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 7.65 cm เพื่อให้ได้ความถี่ตัด (Cut off Frequency) ไม่สูงกว่า 2.3 GHz จากสมการ $f_c = c/\lambda_c$ (โดย c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าประมาณ 3×10^8 m/s)

กระป่องที่ใช้มีขนาด ดังนี้

- ความยาว 11.5 cm
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 cm
- ความถี่ตัด 2.07 GHz
- ความยาวคลื่น cut off 14.49 cm



รูปที่ 3.2 ท่อนำคลื่นทรงกระบอกและระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง D

3.1.1.2 คำนวณระยะติดโพรบห่างจากก้นของกระป่องดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ค่า $\lambda/4$ จากความถี่ 2.26 GHz ที่เลือกใช้เป็นความถี่เริ่มต้นของระบบทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นในสุญญากาศเท่ากับ 13.27 cm ตามสมการ $\lambda = c/f$ ดังนั้นจึงได้ระยะติดสายอากาศเท่ากับ $13.27/4 = 3.32$ cm



รูปที่ 3.3 ครอบอลูมิเนียมและระยะจากกันครอบเพื่อใส่โพรบ

3.1.1.3 เตรียมโพรบแบบโมโนโพลที่จะใช้ ทำจากลวดทองแดง โดยคำนวณความยาวสายอากาศจากสมการ $\lambda/4$ ได้ค่า 3.32 cm จึงต้องตัดลวดทองแดงให้ยาวกว่าค่าที่ใช้ เพื่อทำการตัดลวดจนได้ค่าที่ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำกว่า -10 dB

3.1.1.4 ทำการเจาะรูครอบด้วยระยะห่างจากกันครอบตามค่าที่คำนวณจากสมการ $\lambda/4$ จะได้ค่า 3.32 cm

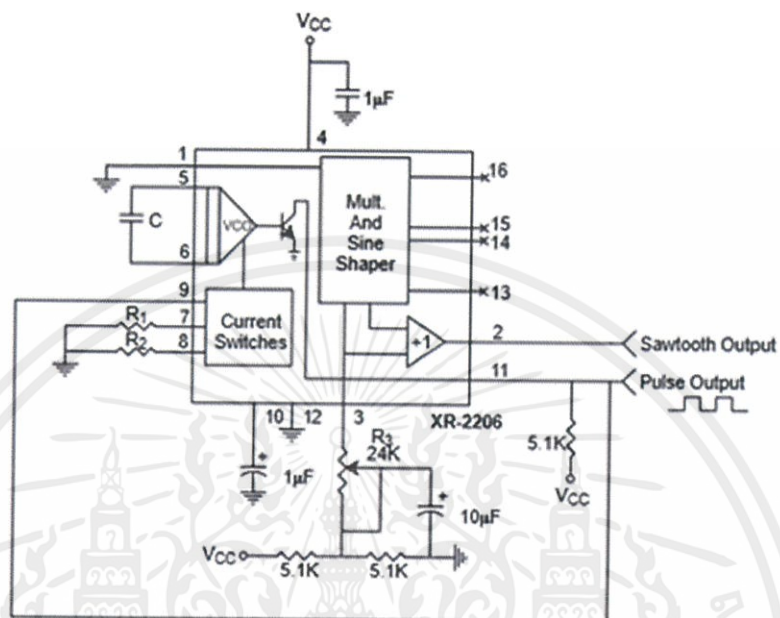
3.1.1.5 บัดกรีตัว Microwave Connector หรือ SMA Connector กับลวดโมโนโพลแล้วติดตั้งที่รูที่เจาะไว้

3.1.1.6 ต่อสาย Coaxial ที่ทำจากสาย RG - 58 เข้ากับ SMA Connector เพื่อเตรียมตัวทำการทดลองวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ

3.1.2 การออกแบบวงจรภาคกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยาย และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

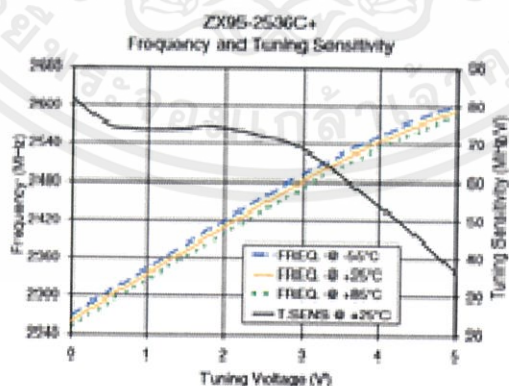
ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยาย และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยในวงจรนี้จะใช้สวิตช์แบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ โหมดคลื่นต่อเนื่อง ใช้เพื่อตรวจจับความเร็วของเป้าหมายและ โหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ ใช้เพื่อตรวจจับระยะทางของเป้าหมาย

3.1.2.1 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.4 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.4 จะทำการปรับค่าตัวต้านทานที่ขา 7 เพื่อให้สัญญาณสามเหลี่ยมมีคาบเวลาเท่ากับ 40 ms และมีแรงดันอยู่ในช่วง 0 - 5 โวลต์ เพื่อจ่ายแรงดันนี้ให้กับ Voltage Controlled Oscillator ZX95-2536C+ (VCO) ซึ่งแรงดันในช่วง 0 - 5 โวลต์นี้ จะมีหน้าที่ไปทำให้เกิดค่าความถี่ของในช่วง 2.26 - 2.59 GHz โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ค่าแรงดันที่จ่ายให้ VCO ให้เกิดความถี่ต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

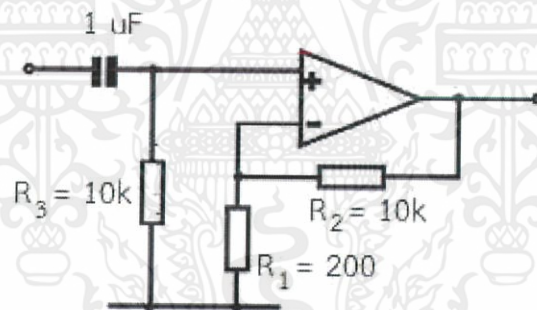
3.1.2.2 การออกแบบวงจร Video Amplifier

1) Non - inverting Amplifier

จากรูปที่ 3.6 ออกแบบโดยการกำหนดค่า R_1 ให้มีค่า 200 Ω และ เลือกค่า R_2 (ตัวต้านทานปรับค่าได้) ให้มีค่าเท่ากับ 10 k Ω นำมาคำนวณหาอัตราขยายจากสมการที่ 3.1 จะได้อัตราขยายเท่ากับ 50 เท่า

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (3.1)$$

ค่าของ R_3 โดยปกติควรมีค่ามาก เช่น 100 k Ω หรือมากกว่า ทั้งนี้ข้อสังเกตคือ C_1 กับ R_3 ที่ต่อกันในลักษณะนี้จะรวมตัวกันเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบลำดับที่ 1 ที่มีความถี่ตัด ดังนั้นควรต้องพิจารณาเรื่องการเลือกค่า C_1 เพื่อระวังเรื่องจุดตัด (cut off) ที่จะเกิดขึ้น (หมายเหตุ: โดยปกติจุดตัดจะเกิดขึ้นที่ความถี่ซึ่งค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน) จะได้ค่าอุปกรณ์ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 Non-inverting Amplifier

2) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

สามารถคำนวณพารามิเตอร์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen - Key ได้จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวกรองแบบ Butterworth ลำดับที่ 2 ได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{1}{(s^2 + 1.414s + 1)}$$

$$= \frac{aKG_1G_2}{s^2C_1C_2 + s[C_2(G_1 + G_2) + C_1G_2(1 - K)] + G_1G_2}$$

เลือกให้ $C_1 = C_2 = C = 1 \text{ nF}$ และ $G_1 = G_2 = G = \frac{1}{R}$

จะได้ $T(s) = \frac{aK\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$

โดย $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ และ $Q = \frac{1}{(3-K)}$ ดังนั้นจะได้ $R_A = 18 \text{ k}\Omega, C = 1 \text{ nF}$

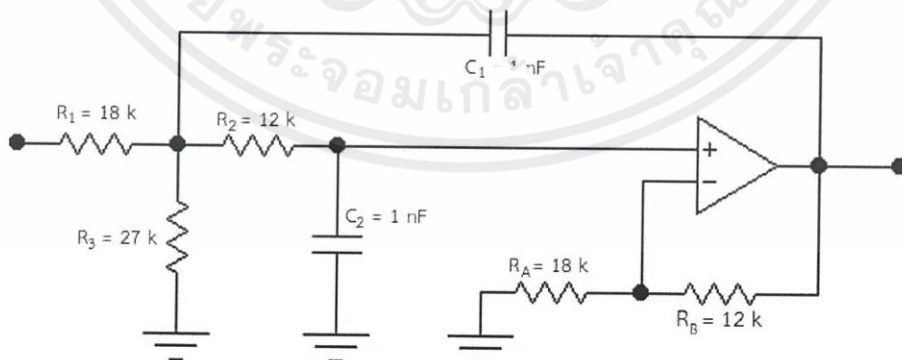
$$R = R_2 = \frac{1}{\omega_0 C} = 10610.3 = 11 \text{ k}\Omega \approx 12 \text{ k}\Omega$$

$$K = 3 - Q^{-1} = 3 - 0.7071^{-1} = 1.5858 = 1 + \frac{R_B}{R_A}; R_B = 12 \text{ k}\Omega$$

$$a = \frac{1}{K} = 0.6306, R_1 = \frac{1}{aG_1} = 19029 \Omega = 18 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{1}{G_1(1-a)} = 28.7 \text{ k}\Omega \approx 27 \text{ k}\Omega$$

จะได้วงจรดังรูปที่ 3.7

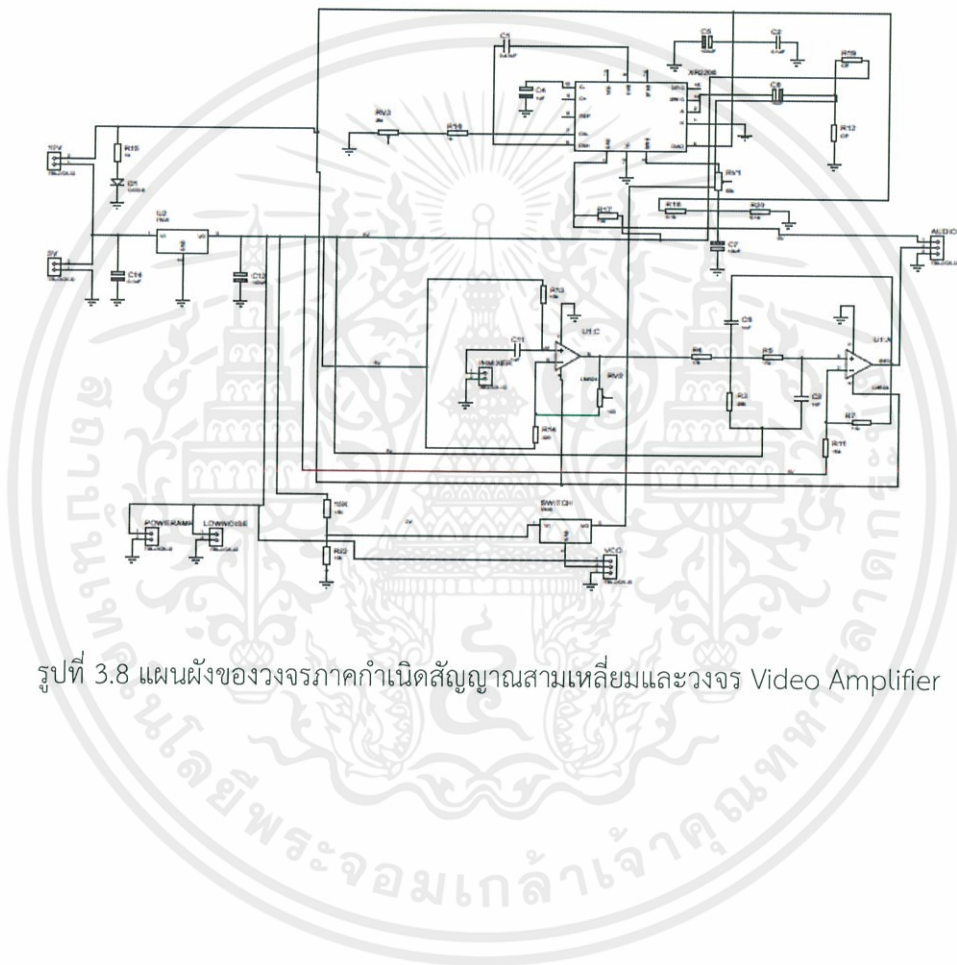


รูปที่ 3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

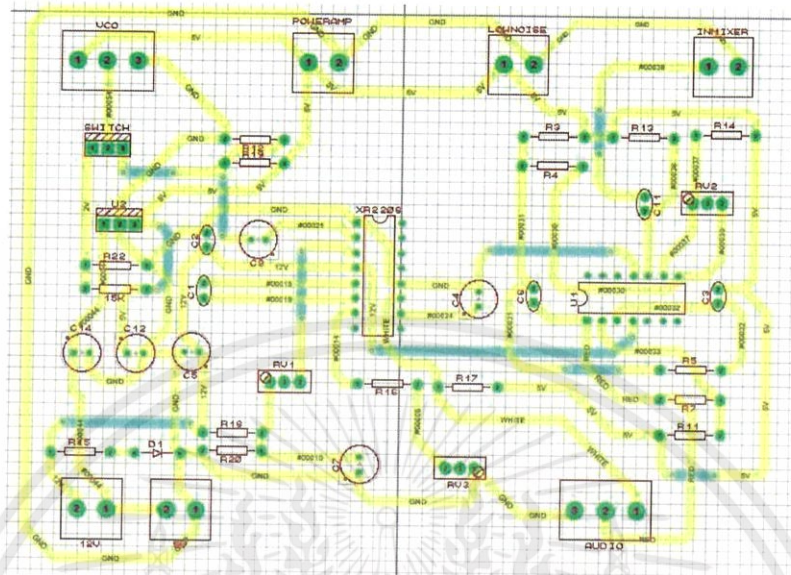
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 การออกแบบลายวงจรภาคกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier

ออกแบบวงจรภาคกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier ที่ประกอบไปด้วยวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและวงจร Non - inverting Amplifier โดยใช้โปรแกรม Proteus ได้ดังรูปที่ 3.8

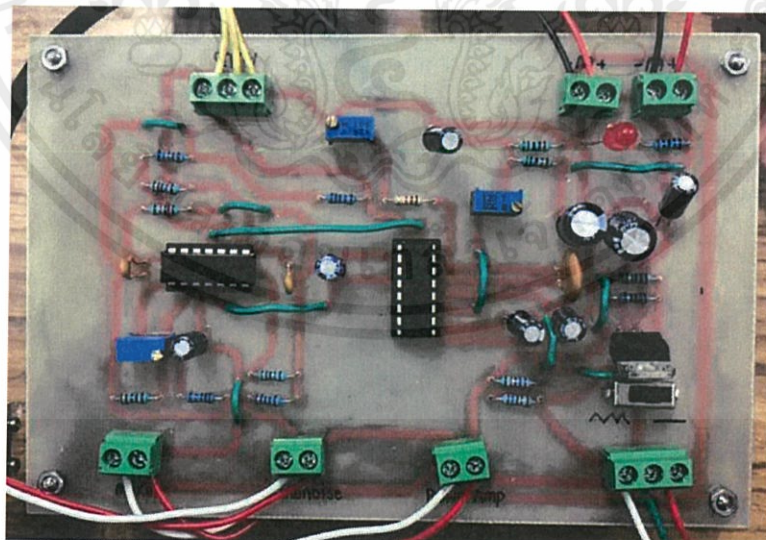


รูปที่ 3.8 แผนผังของวงจรภาคกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier



รูปที่ 3.9 ลายวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier

จากนั้นนำลายวงจรที่ต้องการมาทาบหรือสกรีนลงบนแผ่นทองแดงที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นจะได้ลายวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจร Video Amplifier บนแผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณ และ Video Amplifier

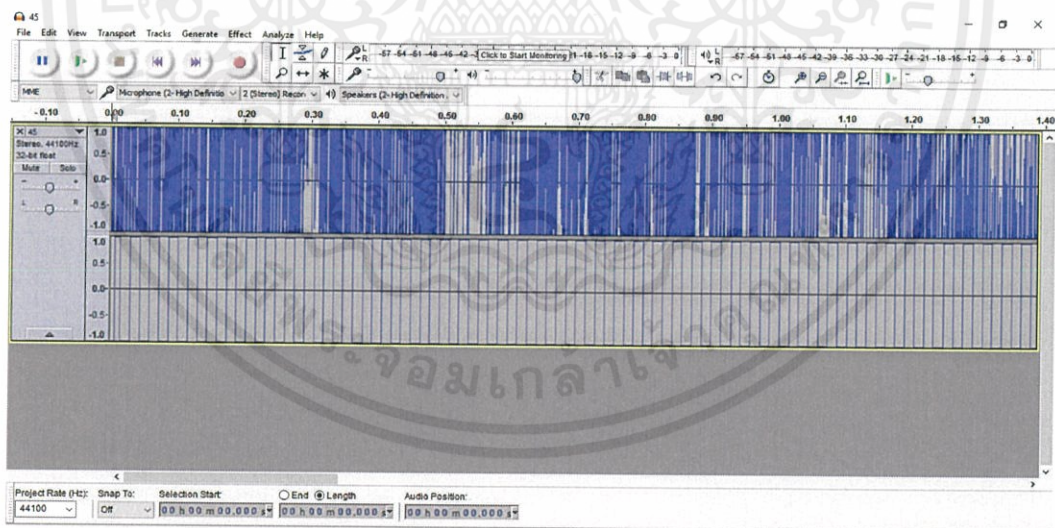
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การประมวลสัญญาณเรดาร์

เมื่อสัญญาณออกจากส่วนของวงจร Video Amplifier จะถูกนำไปประมวลผลสัญญาณผ่านระบบซอฟต์แวร์

3.1.3.1 การอินเทอร์เฟซผ่าน Sound Card

การนำสัญญาณที่ออกจากวงจร Video Amplifier ไปประมวลผลสัญญาณเสียงผ่านระบบซอฟต์แวร์จะดำเนินการผ่านโปรแกรม Audacity ซึ่งเป็นโปรแกรมปรับแต่งเสียงที่บันทึกเสียง เล่นเสียงและผสมเสียงหรือทำ effect ด้วยฟิลเตอร์ต่าง ๆ ได้ ในส่วนของปริยญาณินพจน์นี้ใช้เพียงบันทึกสัญญาณเสียงที่ได้รับออกมาจากส่วนวงจร Video Amplifier เท่านั้น โดยเชื่อมต่อกับระบบเรดาร์ด้วยสาย Audio cord ที่ต่อเข้ากับ Sound Card บนเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยบันทึกสัญญาณเสียงเป็นแบบ Stereo สาย Audio cord สีแดงจะรับสัญญาณช่องขวาที่เป็นเอาต์พุตมาจากวงจร Video Amplifier และสีขาวยจะรับสัญญาณช่องขวาซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นเอาต์พุตจากวงจรมอดูเลตหรือจากขา 11 ของ XR – 2206 กล่าวคือเราสามารถใช้อัตราสัญญาณทั้ง 2 ช่องนี้ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งการบันทึกสัญญาณเสียงที่ได้มาจากระบบเรดาร์สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 3.11 โดยในการใช้โปรแกรม Audacity ได้มีการตั้งค่าดังนี้คือ ค่า Project Rate (Hz) คือ 44100 การตั้งค่า Spectrograms ค่า Maximum Frequency (Hz) คือ 4000 และค่า Gain (dB) คือ 20

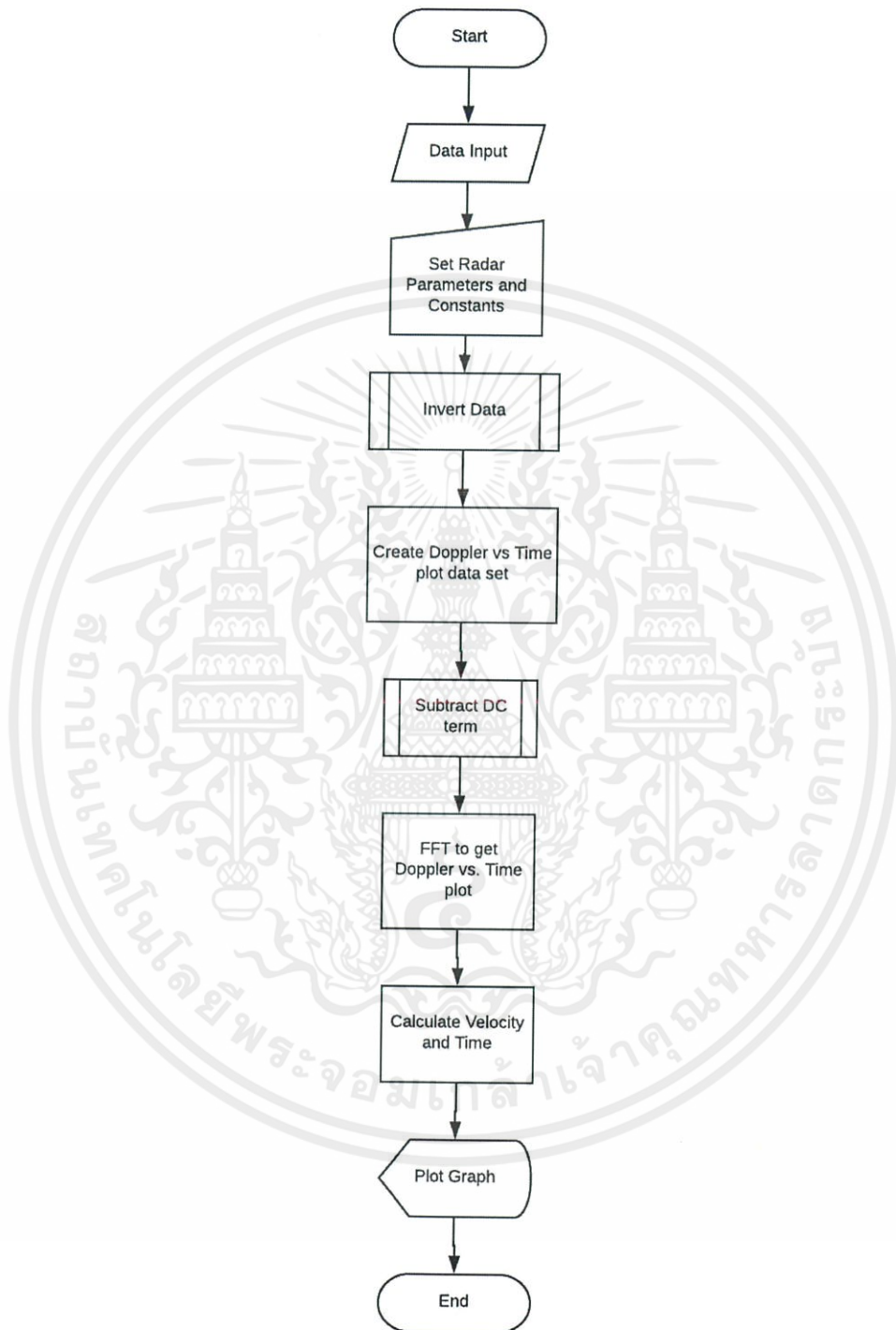


รูปที่ 3.11 การบันทึกสัญญาณเสียงของโปรแกรม Audacity

3.1.3.2 การประมวลผลสัญญาณในโหมดคลื่นต่อเนื่อง

หลังจากสัญญาณ IF ถูกขยายและกรองส่วนความถี่ต่ำผ่านในวงจร Video Amplifier จะได้เป็นสัญญาณวีดิโอซึ่งจะกลายเป็นข้อมูลอินพุตของการประมวลผลสัญญาณหลังมีการบันทึกสัญญาณด้วยโปรแกรม Audacity เพื่อตรวจจับความเร็ว หลังจากถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลโดยพอร์ตเสียงของคอมพิวเตอร์ ข้อมูลอินพุตจะถูกนำไปประมวลผลในโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีผังงานการทำงานดังรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 ผังงานหลักการทำงานในโหมดคลื่นต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มการประมวลผลจากการอ่านค่าสัญญาณอินพุตด้วยคำสั่ง Audioread เพื่อแปลงเป็นข้อมูลตัวเลขและกำหนดค่าความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณ หลังจากนั้นจึงเป็นการตั้งค่าตัวแปรและพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการคำนวณต่างๆ ดังรูปที่ 3.13

```
clear all;
close all;

%read the raw data .wave file here
[Y,FS] = audioread('mom70last.mp4');
%FS=44100
%constants
c = 3E8; %(m/s) speed of light

%radar parameters
Tp = 0.02; %(s) pulse time
N = Tp*FS; %# of samples per pulse
fc = 2408E6; %(Hz) Center frequency (connected VCO Vtune to +5 for example)
```

รูปที่ 3.13 โค้ดส่วนการอ่านสัญญาณและตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบ

ทำการสร้างเซตข้อมูลดอปเปลอร์ให้ได้ตรงกับเวลาจริงที่ใช้ แล้วจึงลบค่ากระแสไฟตรง DC ออกโดยการลบค่าเฉลี่ยของข้อมูลดังรูปที่ 3.14

```
%the input appears to be inverted
s = -1*Y(:,1);
%clear Y;

%creat doppler vs. time plot data set here
for ii = 1:round(size(s,1)/N)-1
    sif(ii,:) = s(1+(ii-1)*N:ii*N);
end

%subtract the average DC term here
sif = sif - mean(s);
```

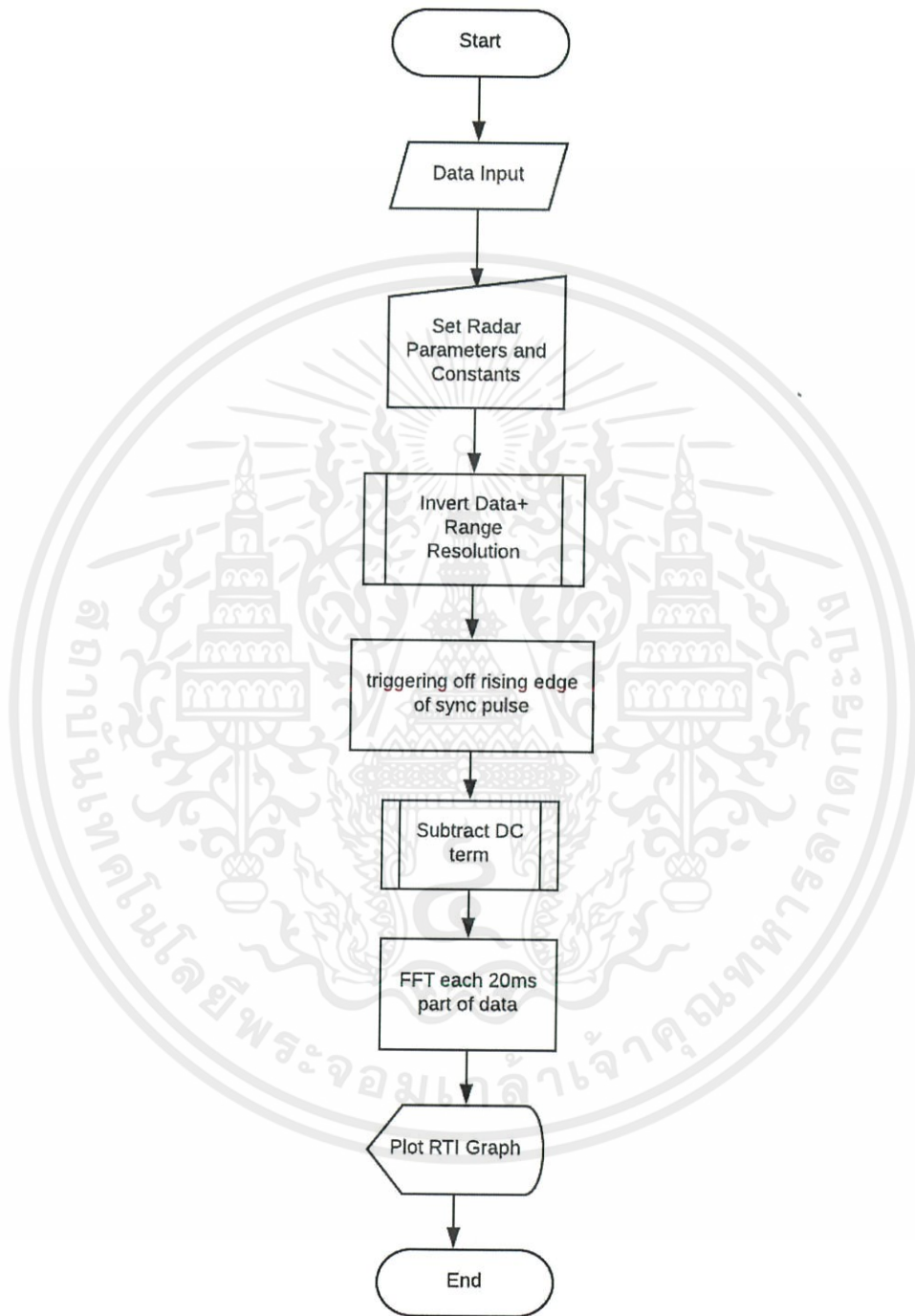
รูปที่ 3.14 โค้ดส่วนการ invert สร้างค่าเวลาและลบกระแสไฟตรง

เนื่องจากข้อมูลมาจากสัญญาณในโดเมนเวลาจึงทำการแปลงฟูเรียร์ด้วยคำสั่ง FFT เพื่อดึงองค์ประกอบทางความถี่ออกมาคำนวณหาค่าความเร็วตามสมการที่ 2.4 แล้วทำการแสดงผลด้วยการพล็อตสเปกโทรแกรมประกอบไปด้วยกำลังของสัญญาณ เวลาและความเร็วตาม โค้ดในรูปที่ 3.15

```
%doppler vs. time plot:
v = dbv(fft(sif,zpad,2));
v = v(:,1:size(v,2)/2);
mmax = max(max(v));
%calculate velocity
delta_f2 = linspace(0, FS/2, size(v,2)); % (Hz)
lambda=c/fc;
velocity = delta_f2*lambda/2;
%calculate time
time = linspace(1, Tp*size(v,1), size(v,1)); % (sec)
%plot
imagesc(velocity,time,v-mmax, [-35, 0]);
```

รูปที่ 3.15 โค้ดส่วนคำนวณและแสดงผลในโหมดคลื่นต่อเนื่อง

3.1.3.3 การประมวลผลสัญญาณในโหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่
 ในขั้นตอนการนำเข้าอินพุตจะทำเหมือนเดิมกับการประมวลผลสัญญาณ
 โหมดความถี่ต่อเนื่อง โดยเห็นได้จากผังงานในรูปที่ 3.16 ต่างกันเพียงค่าพารามิเตอร์ซึ่งของ ความถี่
 ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ จะมีความถี่ต่ำสุดและสูงสุดเนื่องจากเป็นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตทาง
 ความถี่ จึงมีค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ และเซ็ทค่าการเปลี่ยนความถี่ต่อหน่วยเวลาดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 ผังงานหลักการทำงานในโหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%constants
c = 3E8; %(m/s) speed of light

%radar parameters
Tp = 20E-3; %(s) pulse time
N = Tp*FS; %# of samples per pulse
fstart = 2370E6; %(Hz) LFM start frequency for example
fstop = 2480E6; %(Hz) LFM stop frequency for example
%fstart = 2402E6; %(Hz) LFM start frequency for ISM band
%fstop = 2495E6; %(Hz) LFM stop frequency for ISM band
BW = fstop-fstart; %(Hz) transmit bandwidth
f = linspace(fstart, fstop, N/2); %instantaneous transmit frequency

```

รูปที่ 3.17 โค้ดแสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของโหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

เนื่องจากโหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ เป็นการทำงานเพื่อตรวจจับระยะทาง ในการประมวลผลสัญญาณจึงต้องมีการคำนวณค่าความละเอียดของช่วงระยะ (Range Resolution) และระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถตรวจจับเป้าหมายได้ ซึ่งสัญญาณจะรวมถึงพัลส์จากวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมที่จะใช้ในการตั้งค่าข้อมูลทางเวลาให้ตรงกับเวลาที่บันทึกสัญญาณจริง ๆ โดยการใช้ loop for เก็บข้อมูลเป็นชุด ๆ ละ 20 ms โดยอาศัยตัวแปร N ที่มีค่าเท่ากับจำนวนข้อมูลทั้งหมดของอินพุตอิงจากความถี่ที่ใช้ในการ Sampling สัญญาณเสียงจาก Sound Card หรือ FS คูณกับระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ (จากขา 11 ของ XR - 2206) ที่มีค่าเท่ากับคาบเวลาการมอดูเลตของสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งเท่ากับ 20 ms ข้อมูลแต่ละชุดกำหนดได้จากการเทียบเอาต์พุตจาก Video Amplifier กับสัญญาณพัลส์โดยให้เก็บข้อมูลทุกครั้งที่เราขอสัญญาณพัลส์ในคอลัมน์ที่เก็บค่าสัญญาณพัลส์ที่รวมอยู่ในข้อมูลอินพุตดังรูปที่ 3.20 แสดงโค้ดส่วนนี้ในรูปที่ 3.18 และ 3.19

```

%range resolution
rr = c / (2*BW);
max_range = rr*N/2;

%the input appears to be inverted
trig = -1*Y(:,2);
s = -1*Y(:,1);
clear Y;

```

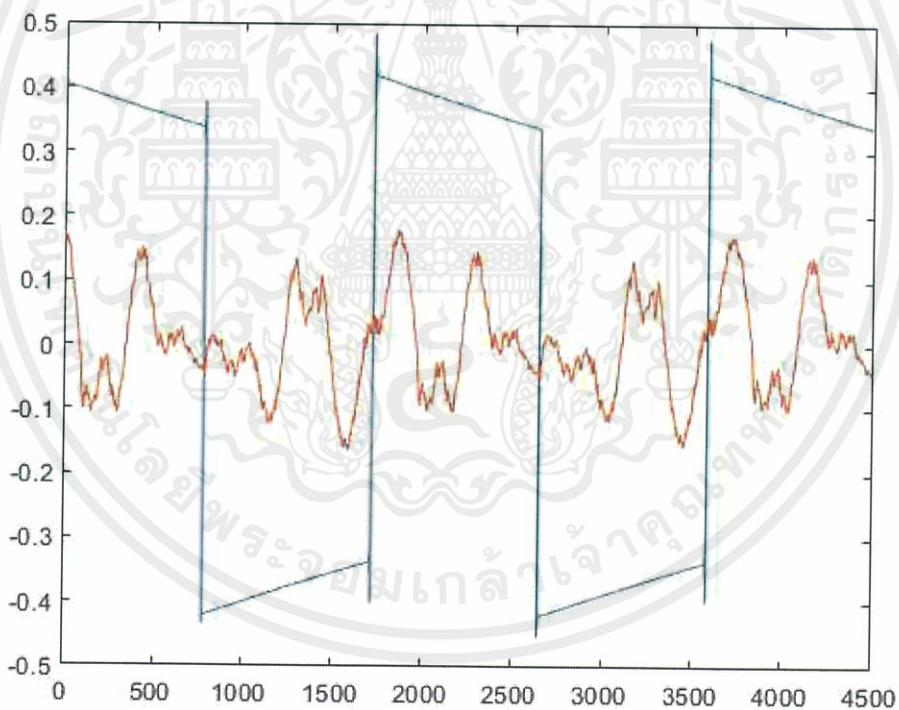
รูปที่ 3.18 โค้ดแสดงการคำนวณความละเอียดของช่วงระยะและการ invert ข้อมูล

```

%parse the data here by triggering off rising edge of sync pulse
count = 0;
thresh = 0;
start = (trig > thresh);
for ii = 100:(size(start,1)-N)
    if start(ii) == 1 & mean(start(ii-11:ii-1)) == 0
        %start2(ii) = 1;
        count = count + 1;
        %sif(count,:) = s(ii:ii+N-1);
        %time(count) = ii*1/FS;
    end
end
end

```

รูปที่ 3.19 โค้ดการกำหนดค่าเวลาโดยเทียบกับสัญญาณพัลส์



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงสัญญาณวิดีโอ (สีแดง) ร่วมกับสัญญาณพัลส์ (สีน้ำเงิน) จากวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งถูกเก็บในชุดข้อมูลอินพุตเดียวกัน โดยจะเก็บข้อมูลของสัญญาณวิดีโอทีละ 20 ms โดยการเขียนคำสั่งเพื่อให้หาค่าขอบของสัญญาณพัลส์

หลังจากนั้นจึงเป็นการลบค่ากระแสไฟตรงโดยการลบค่าเฉลี่ยของข้อมูล ก่อนจะนำไปทำการแปลงฟูเรียร์ด้วยคำสั่ง FFT ก่อนจะพล็อตสเปกโทรแกรม RTI (Range Time Intensity) ประกอบไปด้วยค่ากำลังของสัญญาณ ระยะสูงสุดที่สามารถตรวจจับได้และเวลา ตามโค้ดในรูปที่ 3.21

```
%RTI plot
figure(10);
v = dbv(fft(sif,zpad,2));
S = v(:,1:size(v,2)/2);
m = max(max(v));
imagesc(linspace(0,max_range,zpad),time,S-m,[-80, 0]);
colorbar;
ylabel('time (s)');
xlabel('range (m)');
title('RTI without clutter rejection');
```

รูปที่ 3.21 โค้ดการพล็อตกราฟ RTI

โดยหากต้องการกำจัด clutter หรือสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้สะท้อนกลับมาจากเป้าหมาย ออกไปจากผลลัพธ์เพื่อให้กราฟ RTI แสดงตำแหน่งของเป้าหมายที่เคลื่อนที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถทำได้โดยการลบค่าของข้อมูลที่อยู่ตำแหน่งเดิมในเวลาก่อนหน้าดังแสดงในรูปที่ 3.22

```
%2 pulse cancelor RTI plot
figure(20);
sif2 = sif(2:size(sif,1),:)-sif(1:size(sif,1)-1,:);
v = fft(sif2,zpad,2);
S=v;
R = linspace(0,max_range,zpad);
for ii = 1:size(S,1)
    %S(ii,:) = S(ii,:).*R.^(3/2); %Optional: magnitude scale to range
end
S = dbv(S(:,1:size(v,2)/2));
m = max(max(S));
imagesc(R,time,S-m,[-80, 0]);
colorbar;
ylabel('time (s)');
xlabel('range (m)');
title('RTI with 2-pulse cancelor clutter rejection');
```

รูปที่ 3.22 โค้ดแสดงการพล็อต RTI แบบมีการกำจัด clutter

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ภาค Radar RF, ภาค สายอากาศ, และภาควงจร Baseband

3.2.1 ภาค Radar RF

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาค Radar RF

อุปกรณ์	จำนวน	
Voltage Controlled Oscillator ZX95-2536C+	1	ตัว
SMA Fixed Attenuator VAT-3+	1	ตัว
Power amplifier ZX60-272LN+	1	ตัว
Splitter K1-ZX10+	1	ตัว
Frequency Mixer ZX05-43MH+	1	ตัว
Low Noise Amplifier ZX60-272LN+	1	ตัว
Adapter SMA-M to SMA-M SM-SM50+	4	ตัว

3.2.2 ภาคสายอากาศ

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาคสายอากาศ

อุปกรณ์	จำนวน	
กระป๋อง	2	กระป๋อง
L bracket	2	ตัว
SMA connector Female	2	ตัว
น็อตและแหวน	2	คู่
Lock washers	1	ตัว
สายเคเบิล SMA M-M	3	สาย

3.2.3 วงจรภาค Baseband

ตารางที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองภาค Baseband

อุปกรณ์	จำนวน	
ตลับเมตร	1	อัน
แผ่นอะคริลิก	1	แผ่น
Monolithic Function Generator XR – 2206	1	ตัว
Quadruple Operational Amplifier LM - 324	1	ตัว
แผ่นทองแดง	1	แผ่น
แบตเตอรี่ (AAA)	8	ก้อน
Voltage Regulator LM-7805	1	ตัว
สาย Audio cord	1	เส้น
LED	1	อัน
คอมพิวเตอร์ รุ่น Acer Aspire 5750G	1	เครื่อง
ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ		

3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

การจัดเก็บการทดลอง แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การจัดเก็บผลการทดสอบส่วนฮาร์ดแวร์และการจัดเก็บผลการทดสอบซอฟต์แวร์

3.3.1 การจัดเก็บการทดสอบส่วนฮาร์ดแวร์

การจัดเก็บการทดลองส่วนฮาร์ดแวร์ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่

3.3.1.1 ส่วนสายอากาศ

- 1) ทดสอบวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้งสองตัว
- ทำการ calibrate เครื่อง Network Analyzer รูปที่ 3.23 เพื่อเตรียมการทดสอบวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้งสองตัว

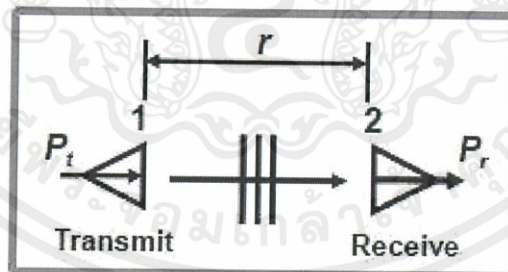


รูปที่ 3.23 เครื่อง Network Analyzer ที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ

- ต่อปลายสาย coaxial อีกฝั่งเข้ากับพอร์ต 1 ของเครื่อง Network Analyzer แล้ว กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ 2 - 3 GHz
- ตัดลวดโมโนโพลจนได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ หรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการ 2.26 - 2.59 GHz

2) ทดสอบวัดค่าอัตราการขยายของสายอากาศทั้งสองตัว

- เนื่องจากสายอากาศที่ใช้ในปริญญาโทนี้เป็นสายอากาศคู่เหมือน จึงสามารถทำการวัดค่าพารามิเตอร์ S21 หรือ Power Coupling $P_r(\theta, \phi) / P_t$ (P_t คือกำลังฝั่งรับและ P_r คือกำลังฝั่งส่ง) ของสายอากาศดังรูปที่ 3.23 เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราการขยายหรือ Gain ตามสมการที่ 2.21 โดยมีขั้นตอนดังนี้



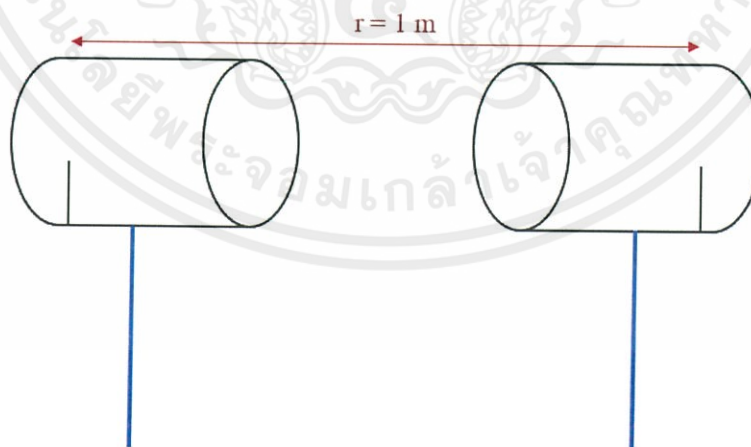
รูปที่ 3.24 การวัด Power Coupling ของสายอากาศคู่เหมือน

- ทำการ calibrate สาย coaxial 2 เส้นที่ต่อกับสายอากาศกับเครื่อง Network Analyzer ที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ตามลำดับ ก่อนจะนำสาย coaxial ไปเชื่อมกับ SMA Connector ของสายอากาศทั้งสองตัว โดยให้สายอากาศที่ต่อกับพอร์ต 1 เป็นสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศที่ต่อกับพอร์ต 2 เป็นสายอากาศฝั่งรับ

- ตั้งสายอากาศทั้งสองในห้องไร้การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความสูงระดับเท่าๆกัน และให้ห่างกันระยะ 1 เมตร ถือเป็นระยะ r ดังรูปที่ 3.26
- กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่า Power Coupling ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ S ที่จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตระหว่างพอร์ต (หรือขั้ว) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า Relative Power Coupled ระหว่างสายอากาศทั้งสองตัว (ฝั่งส่ง - รับ) ซึ่งจะกำหนดให้เป็น 2 - 3 GHz ก่อนทำการวัดค่า Power Coupling แล้วบันทึกผล



รูปที่ 3.25 การตั้งสายอากาศในห้องไร้การสะท้อนเพื่อวัด Power Coupling

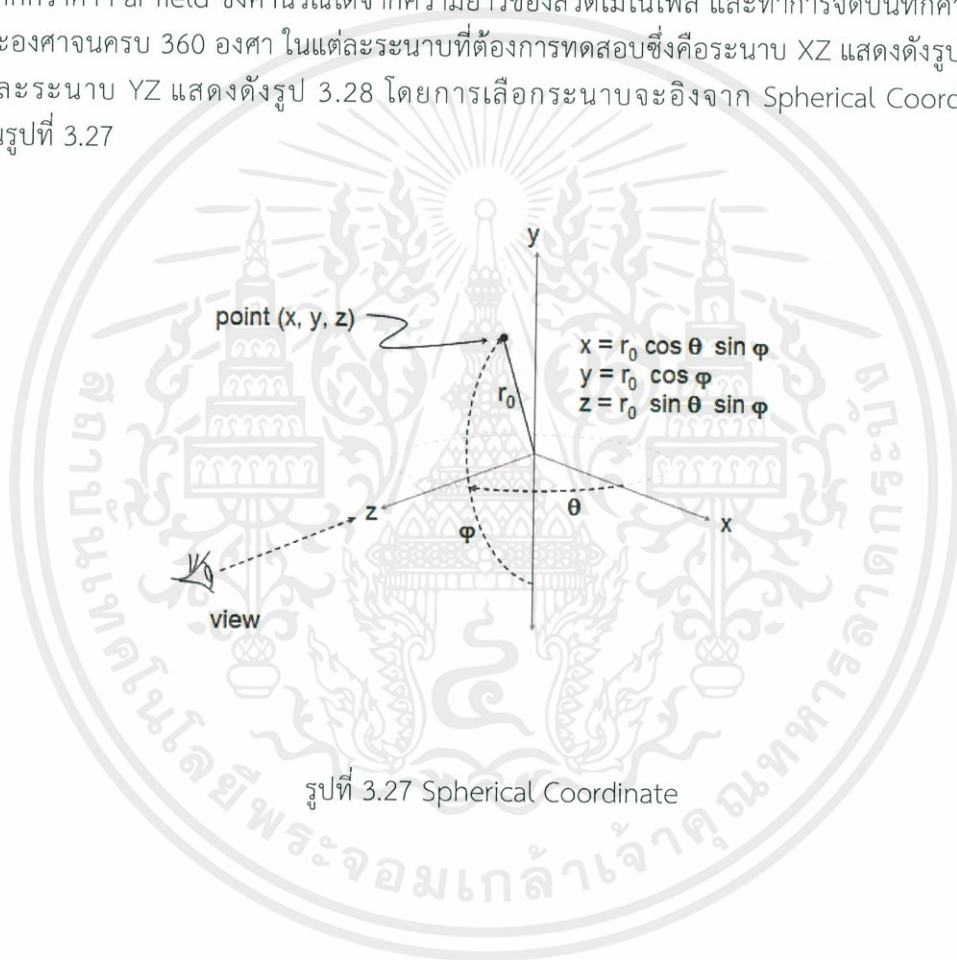


รูปที่ 3.26 การตั้งสายอากาศในห้องไร้การสะท้อนเพื่อวัด Power Coupling

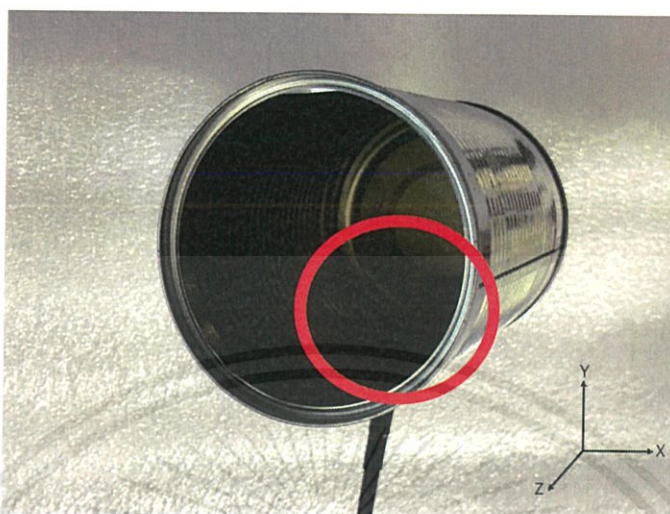
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทดสอบวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

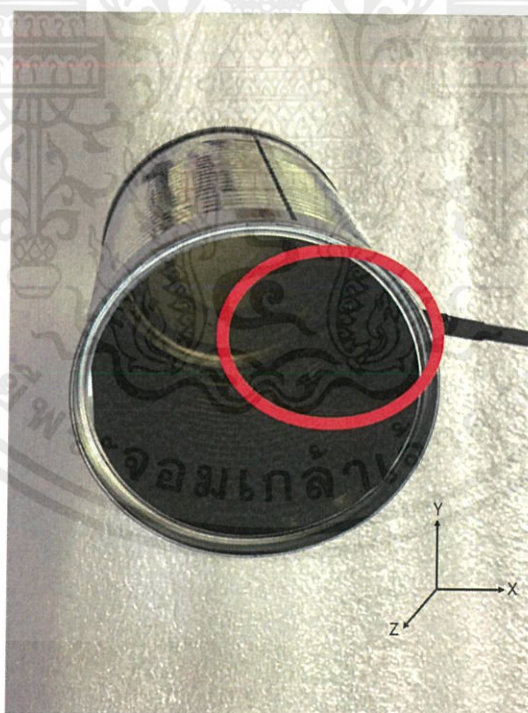
ใช้สายอากาศทั้ง 2 ตัวมาทดสอบโดยการติดตั้งเพื่อทำการทดสอบสายอากาศที่ต้องการทราบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (สายอากาศที่จะใช้ในระบบ) จะเชื่อมต่อกับพอร์ต 2 และ สายอากาศส่งจะใช้สายอากาศคู่เหมือน (คล้ายกับการทดสอบอัตราขยาย) จะเชื่อมต่อกับพอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะเป็นการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 (คุณลักษณะ $|S_{21}|$) โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 จะต้องมากกว่าค่า Far field ซึ่งคำนวณได้จากความยาวของลวดโมโนโพล และทำการจดบันทึกค่าในแต่ละองศาจนครบ 360 องศา ในแต่ละระนาบที่ต้องการทดสอบซึ่งคือระนาบ XZ แสดงดังรูป 3.29 และระนาบ YZ แสดงดังรูป 3.28 โดยการเลือกระนาบจะอิงจาก Spherical Coordinate ในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 Spherical Coordinate



รูปที่ 3.28 การทดสอบ Radiation Pattern ของระนาบ YZ

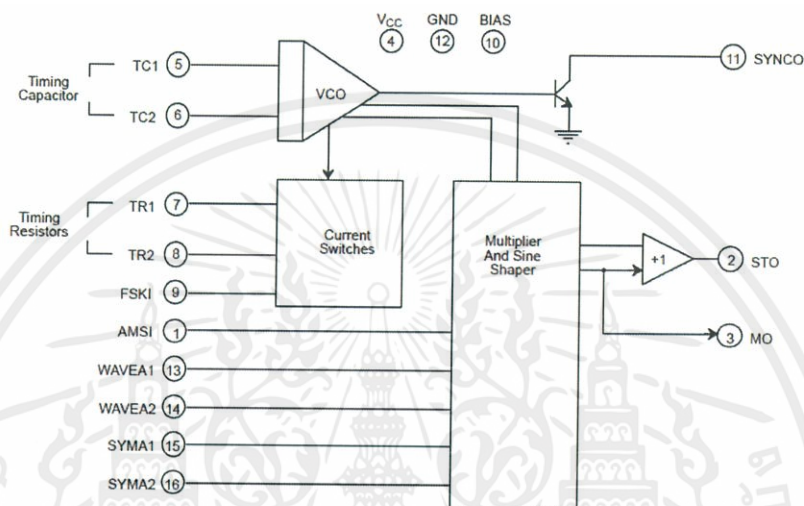


รูปที่ 3.29 การทดสอบ Radiation Pattern ของระนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 ส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ Oscilloscope ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมออกจากขา 2 ของ XR - 2206 และวัดสัญญาณพัลส์ ออกจากขา 11 ของ XR - 2206 ดังรูปที่ 3.30 และแสดงการทำการทดลองได้ดังรูป 3.31 และรูปที่ 3.31

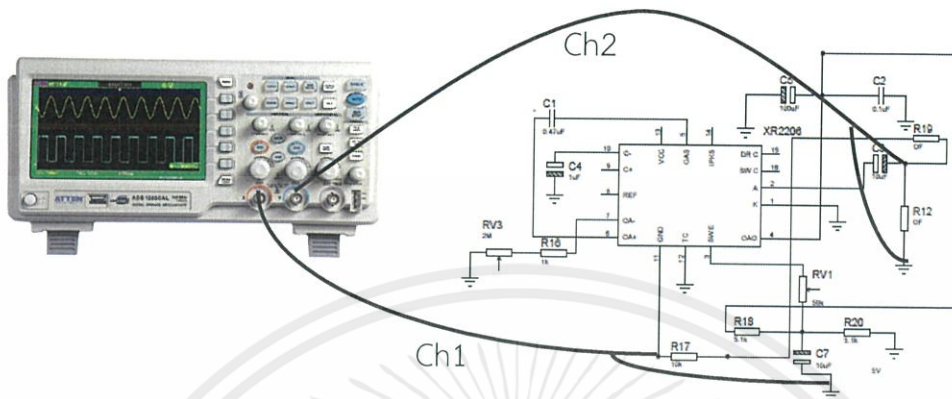


รูปที่ 3.30 บล็อกไดอะแกรมของ XR - 2206



รูปที่ 3.31 ทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

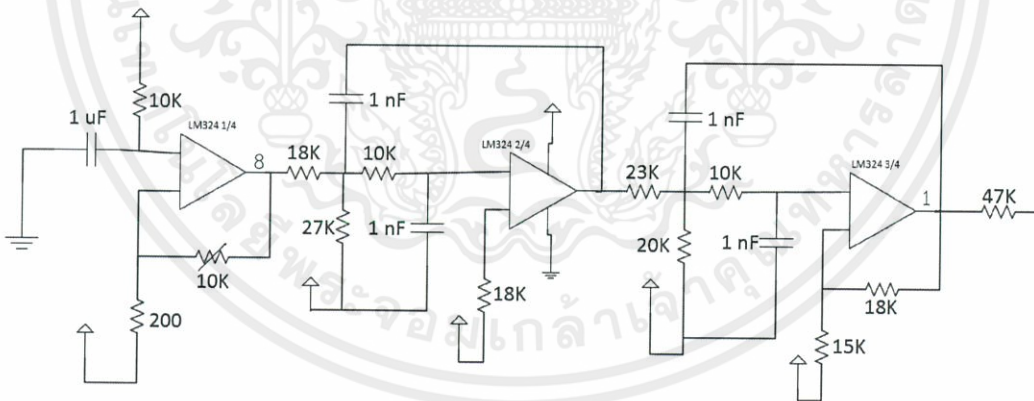
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



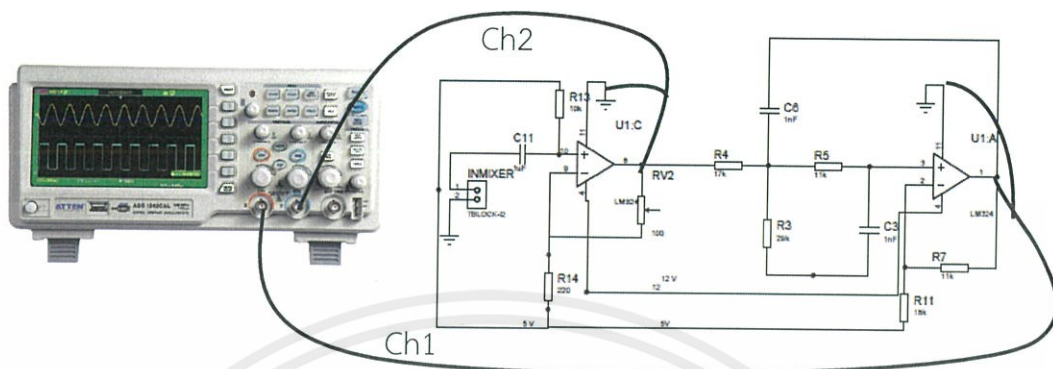
รูปที่ 3.32 ทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

3.3.1.3 ส่วนของวงจรขยายและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ทำการวัดอัตราการขยายและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้ Oscilloscope ทำการวัดอัตราการขยายได้ที่ขา 8 ของ LM - 324 และ ทำการวัดวงจรความถี่ต่ำผ่านได้ที่ขา 1 ของ LM - 324 แสดงได้ดังรูปที่ 3.33 แสดงการทำการทดลองได้ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.33 LM324



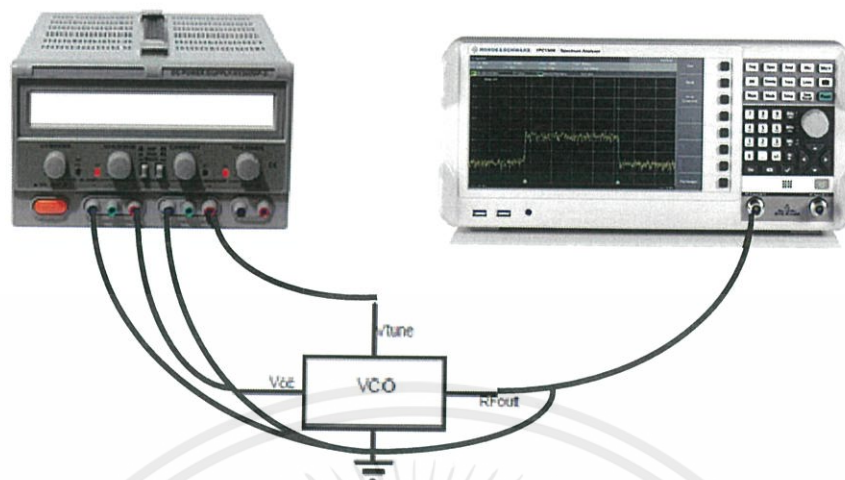
รูปที่ 3.34 ทดสอบวัดอัตราขยายและความถี่ต่ำผ่าน

3.3.1.4 ส่วนการทดสอบอุปกรณ์ Voltage Controlled Oscillator (VCO)

ทำการป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ VCO ที่ขา Vtune ซึ่งต่อเข้ากับเครื่อง Network Analyzer เพื่อแสดงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ป้อนเข้า แสดงภาพอุปกรณ์และการทดลองได้ดังรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 ตามลำดับ



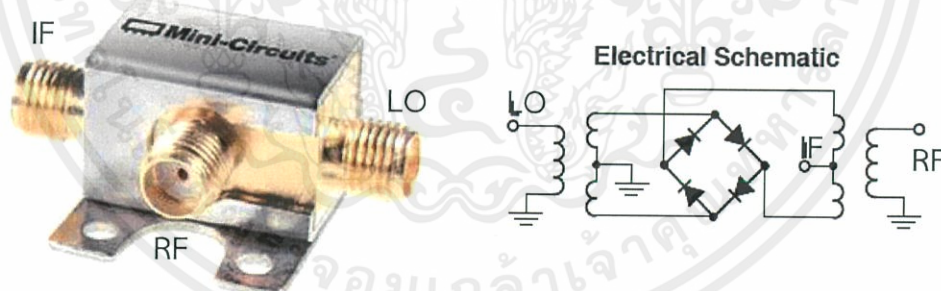
รูปที่ 3.35 อุปกรณ์ VCO



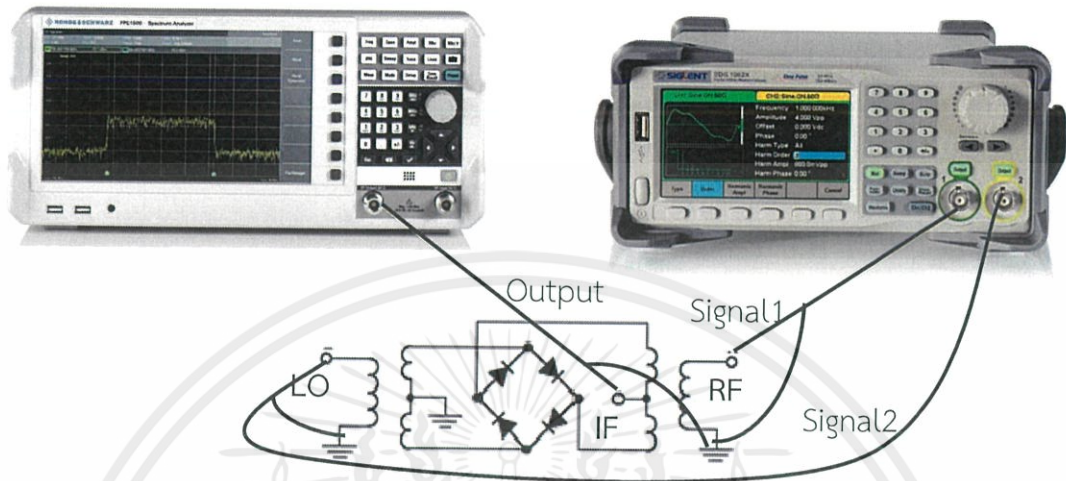
รูปที่ 3.36 การทดสอบ VCO

3.3.1.5 ส่วนการทดสอบอุปกรณ์ Frequency Mixer (Mixer)

ทำการวัดค่าความถี่ที่เกิดจากการสร้างสัญญาณใหม่ที่มีทั้งผลรวมและผลต่างของความถี่เดิม โดยขา LO และขา RF ต่อเข้ากับ Function Generator เพื่อรับสัญญาณ input เข้ามา และต่อขา IF เข้ากับ Network Analyzer แสดงภาพอุปกรณ์และการทดลองได้ดังรูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 ตามลำดับ



รูปที่ 3.37 อุปกรณ์ Mixer และ Electrical Schematic



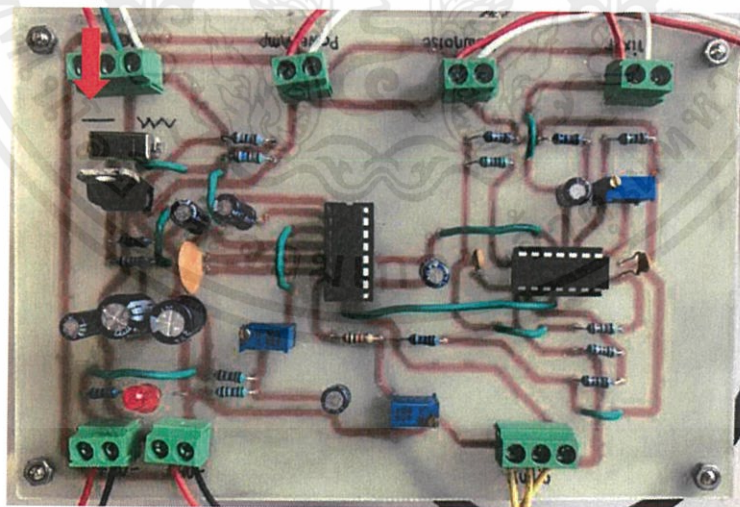
รูปที่ 3.38 การทดสอบ Mixer

3.3.2 การจัดเก็บผลการทดลองของทั้งระบบเรดาร์

การจัดเก็บผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

3.3.2.1 ทดสอบระบบเพื่อตรวจวัดความเร็ว

- เลือกสวิตช์โหมดคลื่นต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.39 สำหรับทำการตรวจวัดความเร็ว



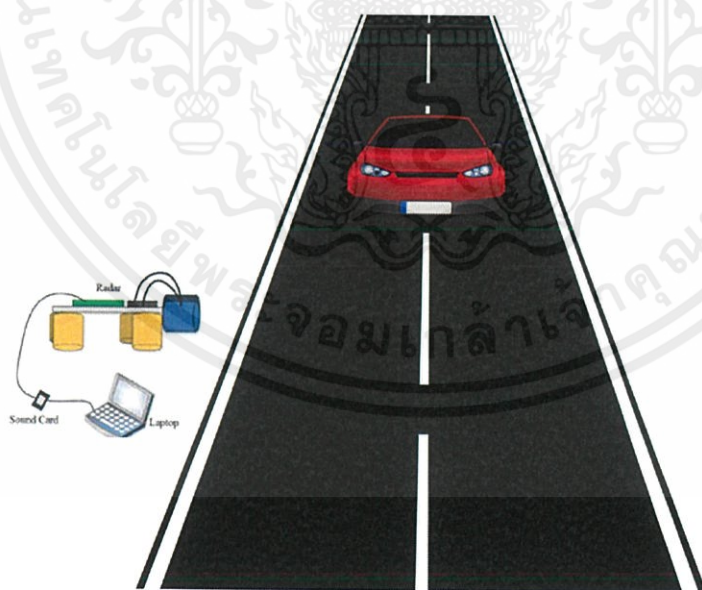
รูปที่ 3.39 สวิตช์โหมดคลื่นต่อเนื่อง สามารถสังเกตได้จากการเลื่อนสวิตช์ไปยังสัญลักษณ์เส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เชื่อมต่อ Audio Input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย Audio Cord
- บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม Audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมายที่เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.40 เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์ คน เป็นต้น
- นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.40 การบันทึกผลจากระบบเรดาร์

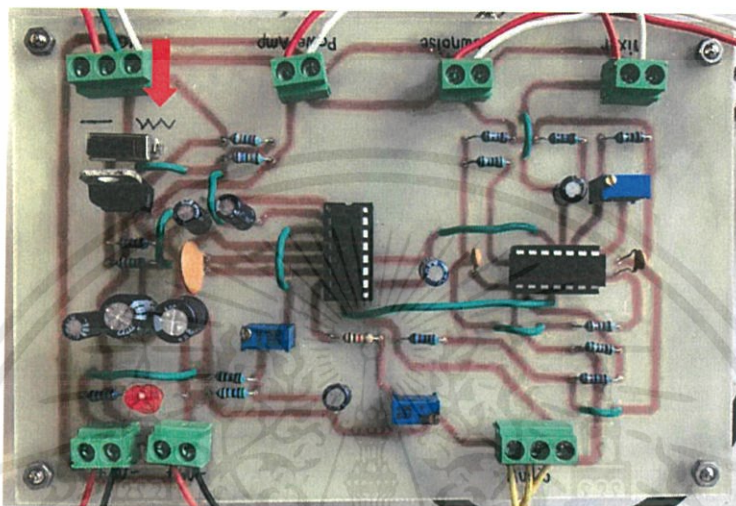


รูปที่ 3.41 การบันทึกผลจากระบบเรดาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 ทดสอบระบบเพื่อตรวจวัดระยะทาง

- เลือกสวิตช์โหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ ดังรูปที่ 3.42 สำหรับทำการตรวจวัดระยะทาง



รูปที่ 3.42 สวิตช์โหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ สามารถสังเกตได้จากการเลื่อนสวิตช์ไปฝั่งสัญลักษณ์สามเหลี่ยม

- เชื่อมต่อ audio input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย audio cord
- บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม Audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมาย
- นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB

บทที่ 4

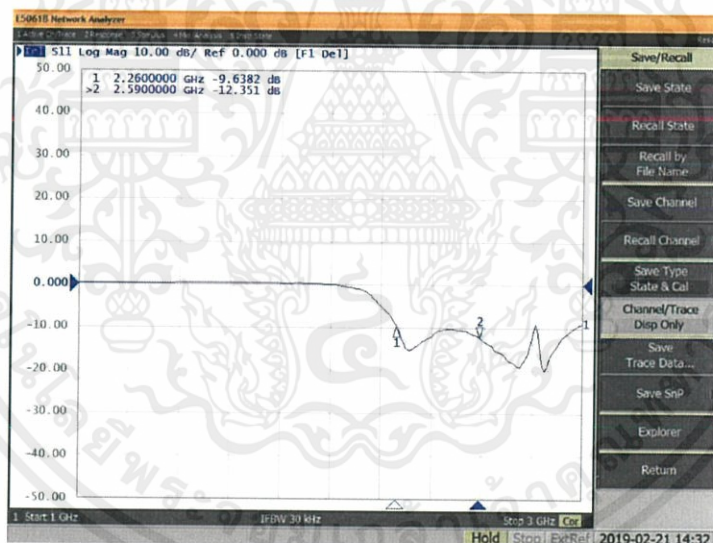
ผลการทดลอง

ภายหลังจากการออกแบบระบบเรดาร์ จัดทำระบบเรดาร์ และจัดเก็บผลการทดสอบแล้ว สามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

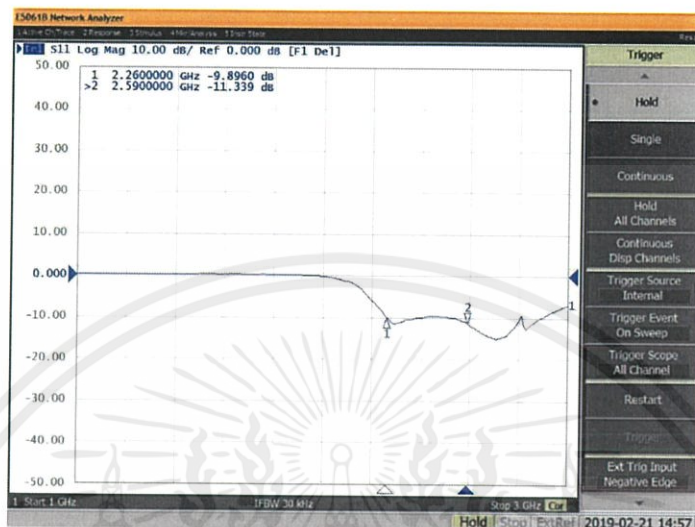
4.1 ผลการทดลองสายอากาศ

4.1.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

เมื่อตัดลวดโมโนโพลจนมีความยาว 2.3 cm ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งส่ง และสายอากาศฝั่งรับแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นข้อมูลจากกราฟวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากเครื่อง Network Analyzer โดยช่วงความถี่ที่พิจารณาคือ 2.26 – 2.59 GHz จะเห็นว่ามีการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB จึงถือว่าสายอากาศนำมาใช้ในระบบได้

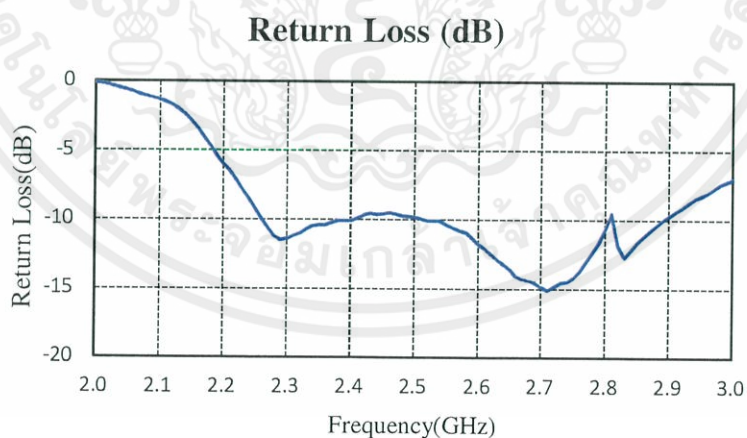


รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ S_{11} หรือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ทดสอบได้ของสายอากาศฝั่งส่ง

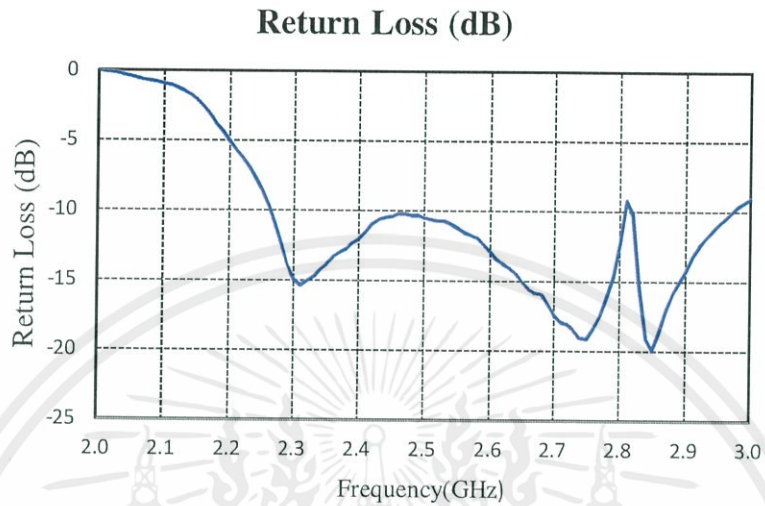


รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ S_{11} หรือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ทดสอบได้ของสายอากาศฝั่งรับ

เพื่อให้สามารถพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ง่ายขึ้น สามารถแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศฝั่งรับได้ในรูปแบบกราฟ ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วง 2 – 3 GHz

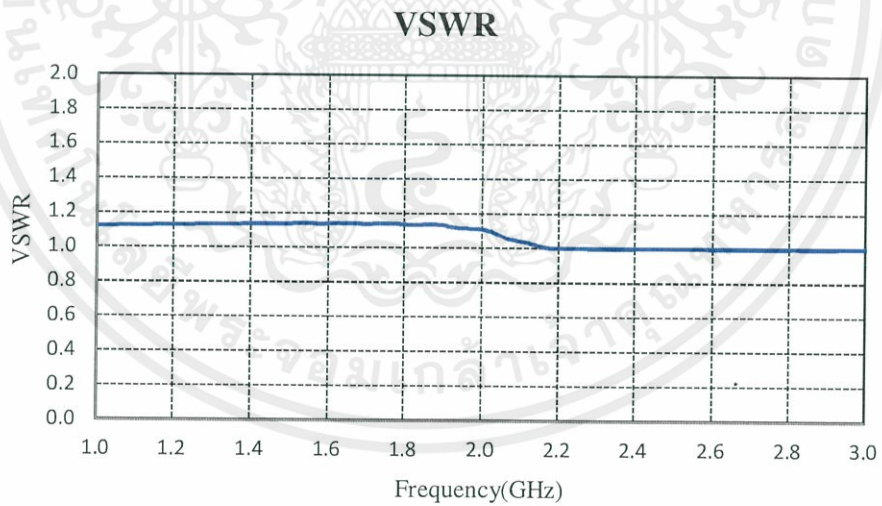


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งส่ง ในช่วงความถี่ 2 - 3 GHz



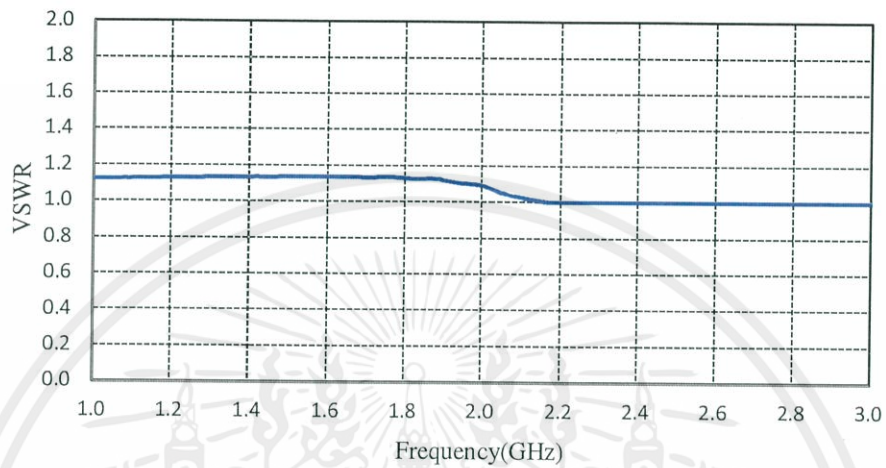
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศฝั่งรับ ในช่วงความถี่ 2 - 3 GHz

หลังจากนั้นจึงวัดค่า VSWR ของสายอากาศฝั่งรับและสายอากาศฝั่งส่งได้ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ 2.2 - 2.6 GHz มีค่า VSWR ที่เข้าใกล้ 1 จึงถือว่านำไปใช้งานได้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศฝั่งส่ง ในช่วงความถี่ 1 - 3 GHz

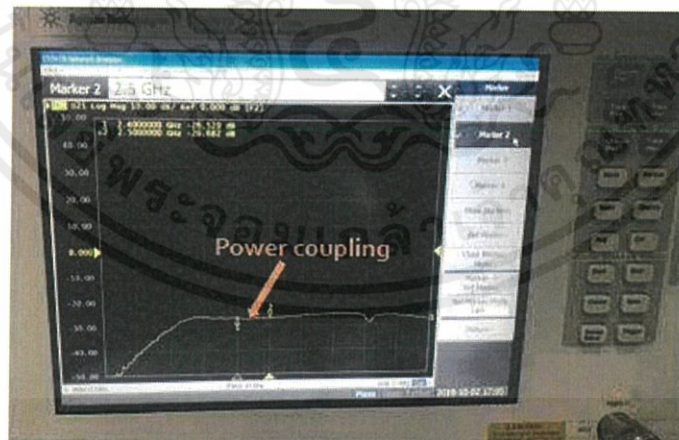
VSWR



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศฝั่งรับ ในช่วงความถี่ 1 - 3 GHz

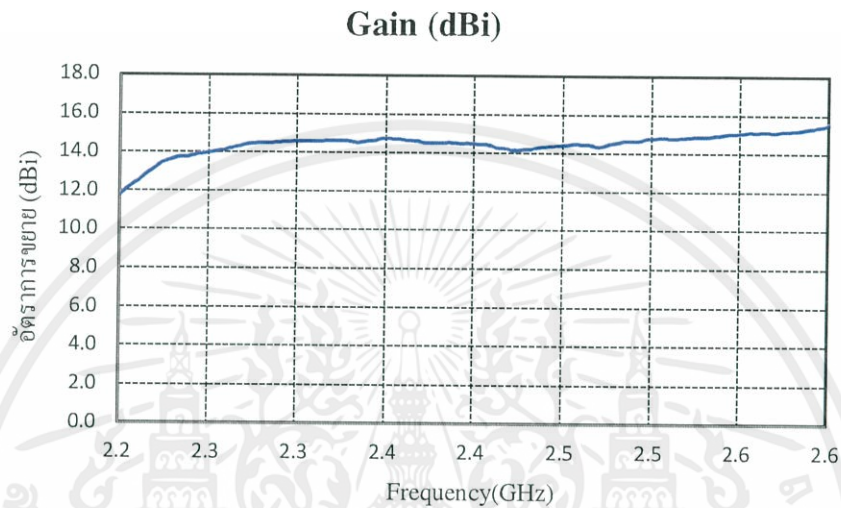
4.1.2 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

จากค่าความถี่ที่ต้องการที่ 2.4 GHz ทดสอบค่า Power Coupling หรือค่า S_{21} (2 - 3 GHz) แล้วทำการทดสอบผล จะได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่า Power Coupling ที่ทดสอบได้

นำค่าที่ทดสอบได้มาคำนวณอัตราขยายตามสมการที่ 2.42 โดยที่ค่า power coupling คือ $P_r(\theta, \phi) / P_t$ แล้วพล็อตกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.8

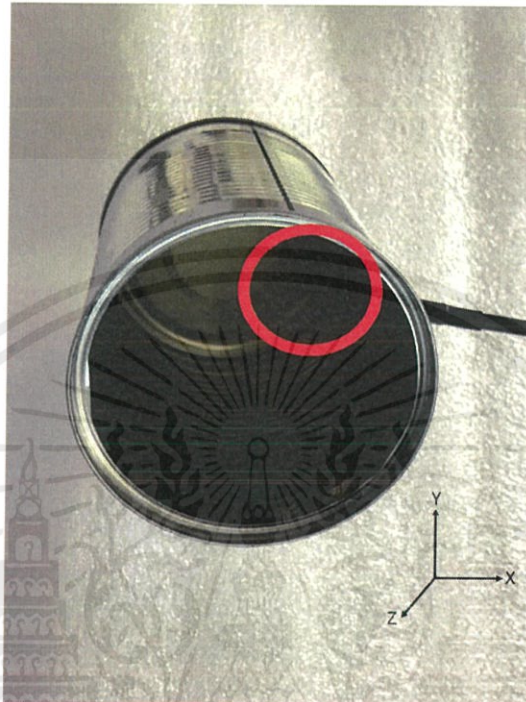


รูปที่ 4.8 กราฟแสดง อัตราการขยาย ของสายอากาศคู่มือนในช่วงความถี่ 2.2 - 2.6 GHz

จากค่า Power Coupling ที่ทดสอบได้ดังรูปที่ 4.7 ทำให้ได้ค่าอัตราการขยาย ประมาณ 14.53 dBi ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี

4.1.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การวางโมโนโพลในระนาบ XZ จะได้ดังรูปที่ 4.9 และ การวางโมโนโพลในระนาบ YZ จะได้ดังรูปที่ 4.10



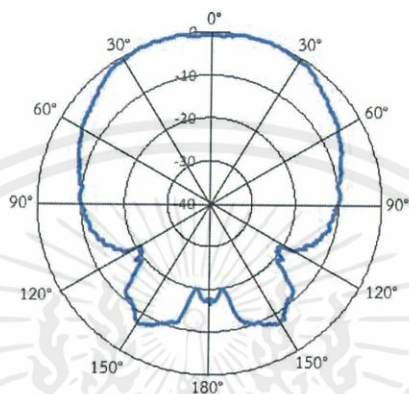
รูปที่ 4.9 การวางโมโนโพลในระนาบระนาบ XZ



รูปที่ 4.10 การวางโมโนโพลในระนาบระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

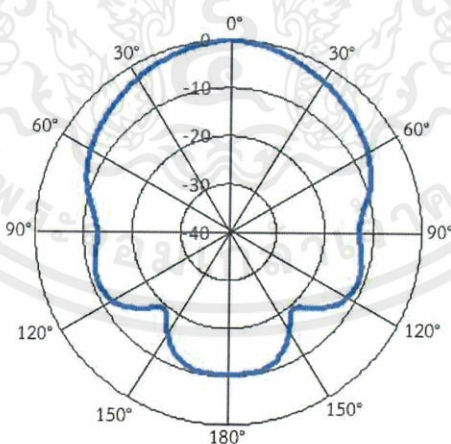
จากการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ จะได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XZ

จากข้อมูลรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทำให้ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width) เท่ากับ 89.11°

จากการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ จะได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ YZ

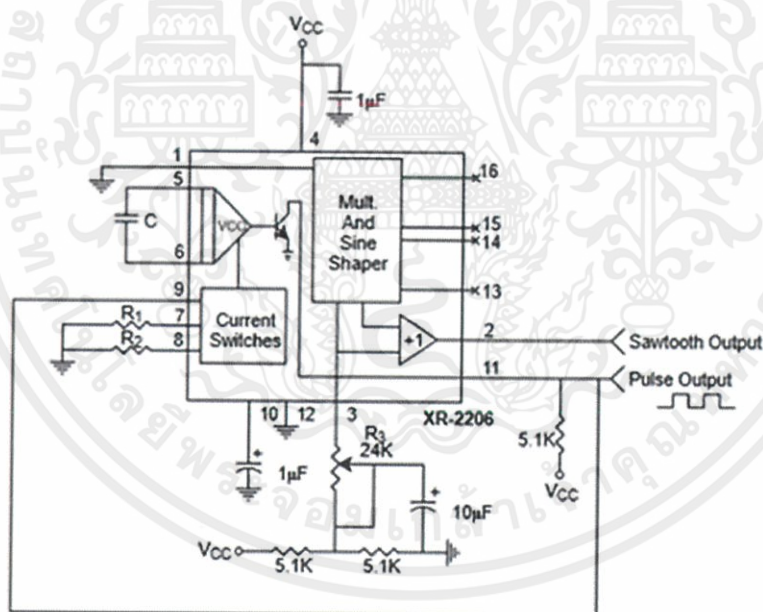
จากข้อมูลรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทำให้ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เท่ากับ 69.51°

จากผลการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ผลสรุปว่าสายอากาศทั้งสองจะมีกำลังส่งละกำลังรับสูงสุด ณ ตำแหน่ง 0 องศา คือหันหน้าตรงสู่วัตถุเป้าหมาย และทำให้ทราบว่าควรตั้งสายอากาศในระนาบ YZ เพราะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ดีกว่าการตั้งสายอากาศในระนาบ XZ

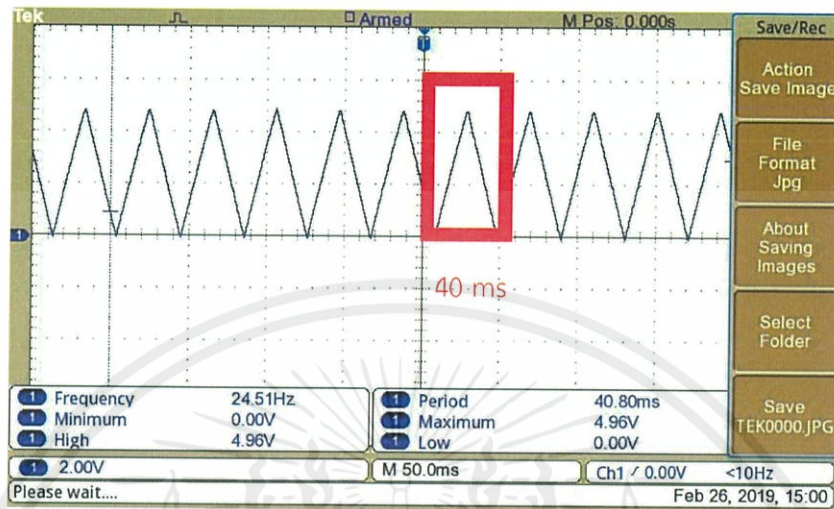
4.2 ผลการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยาย และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

4.2.1 ผลการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ทดสอบสัญญาณเอาต์พุตสัญญาณสามเหลี่ยมออกจากขา 2 ของ XR - 2206 และทดสอบสัญญาณพัลส์ออกจากขา 11 ของ XR - 2206 ดังรูปที่ 4.13 เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกันดังรูปที่ 3.5 ทำการทดลองได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ออกจากของ XR - 2206

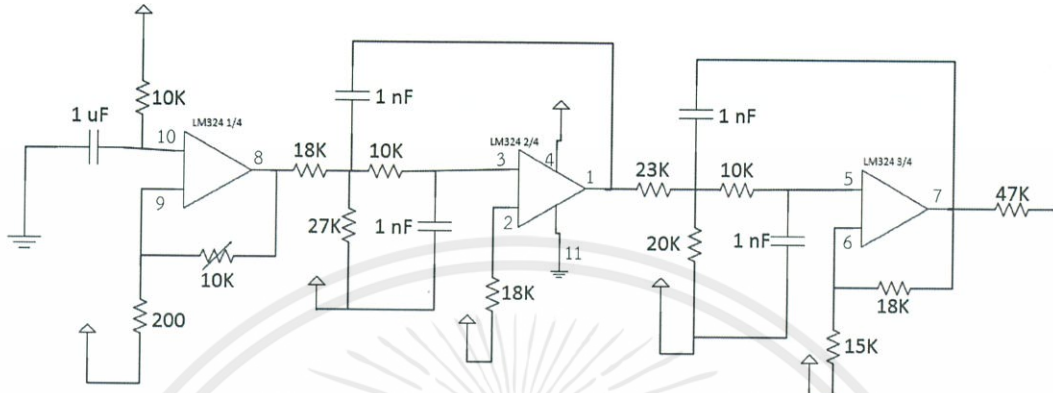


รูปที่ 4.14 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจร Function Generator

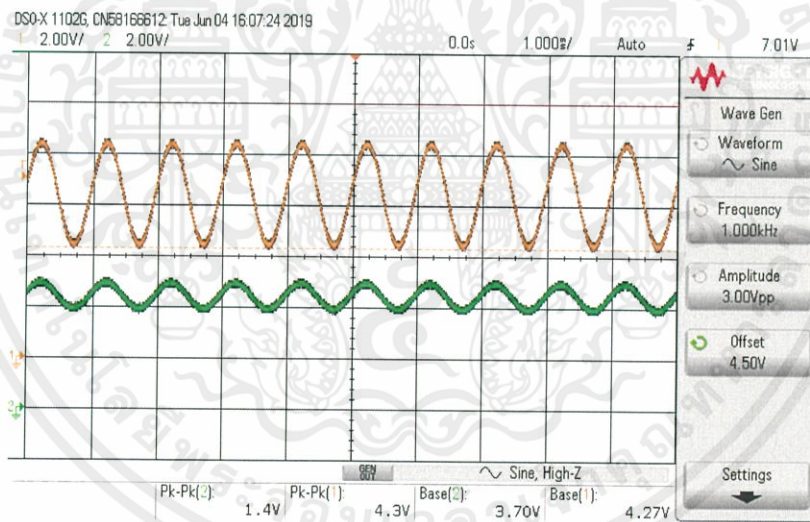
เนื่องจากเราต้องการให้เรดาร์ทำงานในช่วงความถี่ 2.26 - 2.59 GHz ค่าแรงดันที่จ่ายเพื่อให้เกิดสัญญาณในช่วงความถี่นั้นจะอยู่ที่ 0 - 5 โวลต์ และสัญญาณสามเหลี่ยมมีคาบเท่ากับ 40 ms ดังรูปที่ 4.13 ในส่วนของการควบคุมปริมาณแรงดันและค่าคาบของสัญญาณสามเหลี่ยมสามารถปรับได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจร

4.2.2 ผลการทดลองวงจรขยายและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

4.2.2.1 ผลการทดสอบวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยทำการทดสอบอัตราการขยายที่ขา 8 ดังรูปที่ 4.15 ของ LM - 324 โดยวงจรขยายคือส่วนของ op - amp ตัวแรก โดยได้ปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้เป็น 400 Ω ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 โดยมีสัญญาณสี่เหลี่ยมคือสัญญาณอินพุตและสัญญาณสี่เหลี่ยมคือสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งมีอัตราขยายประมาณ 3 เท่าตามสมการที่ 2.49

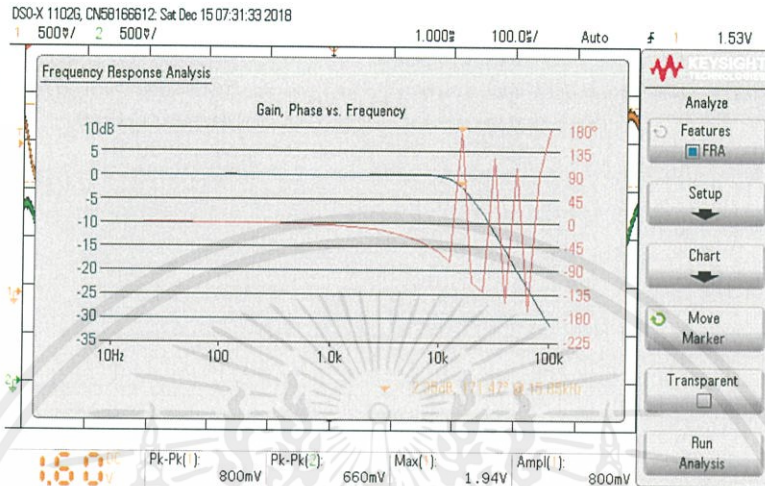


รูปที่ 4.15 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองอัตราการขยายของวงจรขยาย

4.2.2.2 ผลการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยป้อนสัญญาณอินพุตที่ขา 8 แล้วทำการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 7 ของ LM - 324 ดังรูปที่ 4.15 มีจุดตัดความถี่อยู่ที่ประมาณ 16 KHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.17

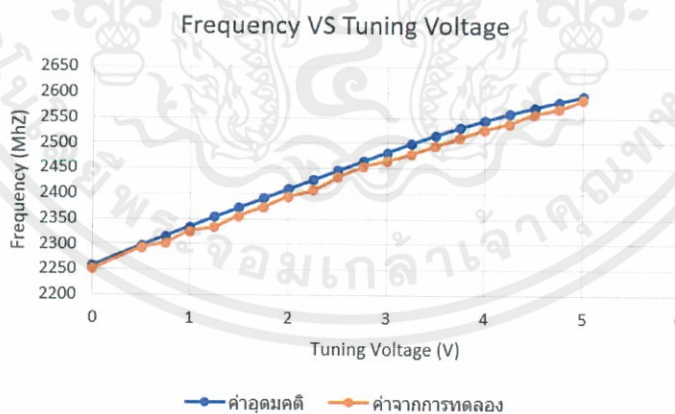


รูปที่ 4.17 Frequency Response ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

4.2.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ Voltage Controlled Oscillator (VCO)

4.2.3.1 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Voltage Controlled Oscillator (VCO)

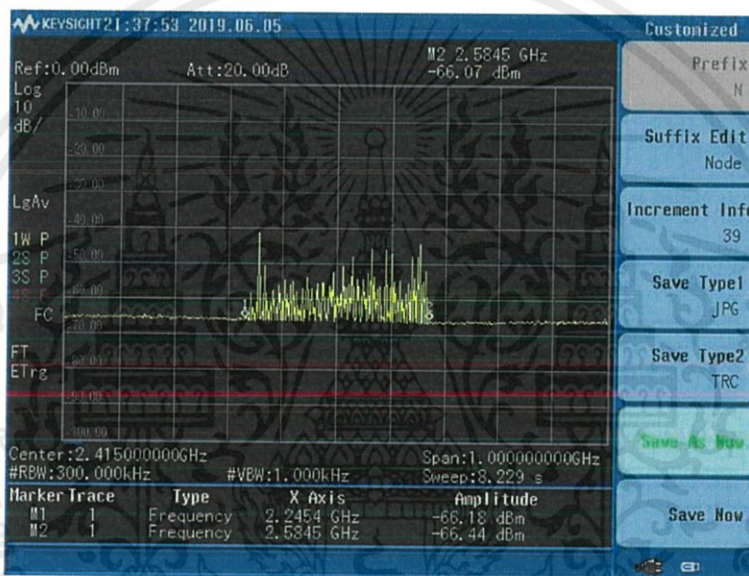
โดยป้อนแรงดันที่ 0 – 5 โวลต์ จะได้ความถี่ได้ดังรูปที่ 4.18



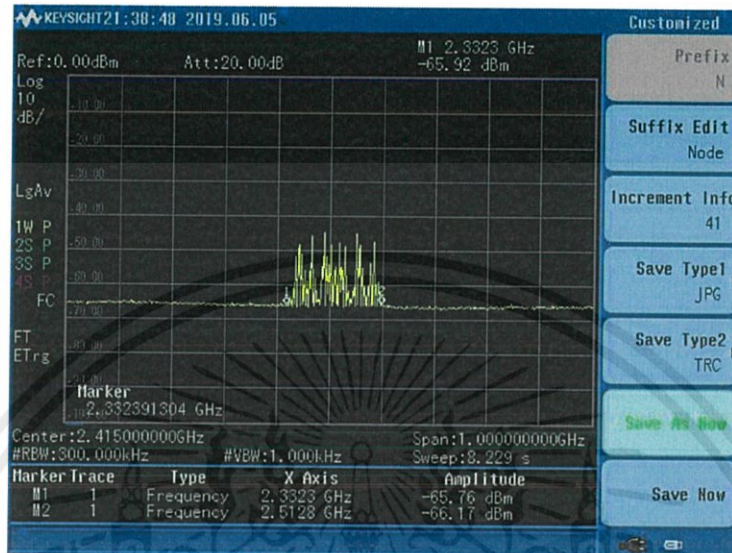
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความถี่อุดมคติและค่าจากการทดลองของ VCO

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าความถี่ที่ใช้งานได้จะอยู่ในช่วง 2.26 – 2.59 ค่าความถี่ที่ทำการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติของอุปกรณ์ Voltage Controlled Oscillator (VCO) จึงถือว่าอุปกรณ์นี้สามารถใช้งานได้ปกติ

4.2.3.2 ทดสอบการปรับแอมพลิจูดของสัญญาณ จะได้แบนด์วิดท์ของสัญญาณดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



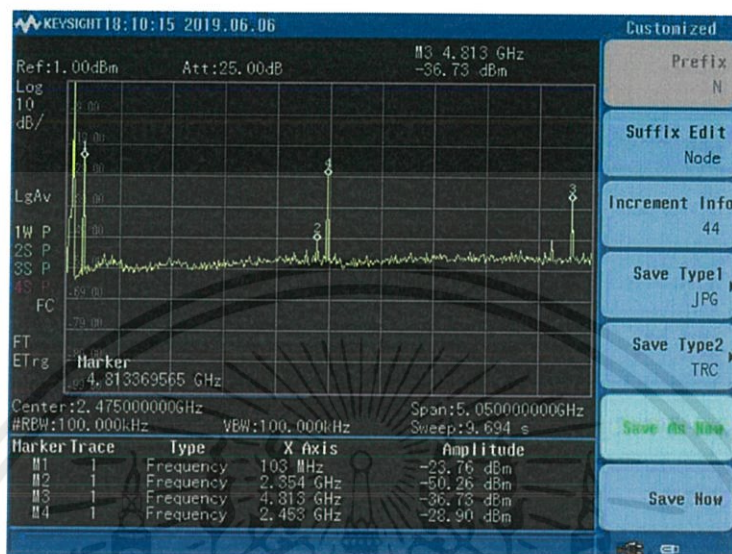
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมแสดงแบนด์วิดท์ของสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณแรงดัน 0 – 5 โวลต์ เข้า VCO



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมแสดงแบนด์วิดท์ของสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณแรงดัน 1 – 3.5 โวลต์ เข้า VCO จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ามีขนาดแบนด์วิดท์ที่ลดลงจากรูปที่ 4.19 เพราะได้ทำการลดขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่นำมาป้อนเข้า Voltage Controlled Oscillator (VCO)

4.2.4 การทดสอบอุปกรณ์ Frequency Mixer (Mixer)

ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Mixer โดยการป้อนความถี่ของสัญญาณเข้าไป 2 สัญญาณ จะได้ผลรวมและผลต่างความถี่ของสัญญาณ จะได้ดังรูปที่ 4.21



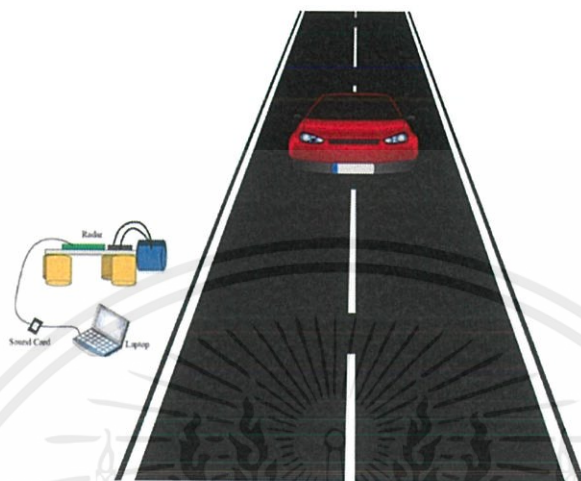
รูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมผลการทดลอง Frequency Mixer โดยจุด M2 และ M4 คือสัญญาณอินพุต จุด M1 คือส่วนต่างของสองสัญญาณอินพุต และจุด M3 คือส่วนรวมของสัญญาณอินพุต

จากรูปที่ 4.21 แสดงเห็นได้ชัดว่ามีความถี่ที่เกิดจากผลรวมและผลต่างความถี่ของสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณ จึงถือว่า Frequency Mixer สามารถใช้งานได้ปกติ

4.3 ผลของการทดลองระบบเรดาร์

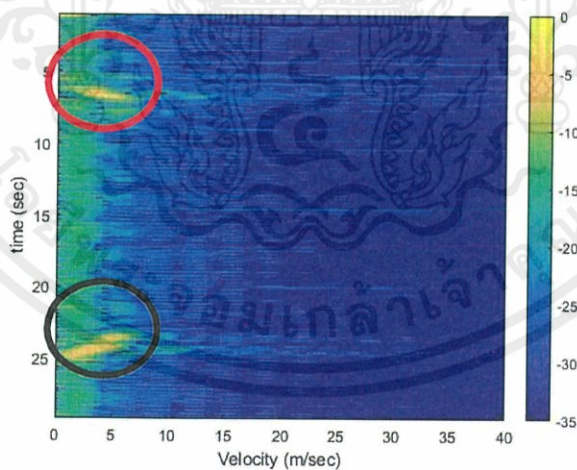
4.3.1 ผลการทดลองตรวจจับความเร็วของเป้าหมายด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง

สำหรับการทดลองในโหมดคลื่นต่อเนื่องเพื่อตรวจจับความเร็ว โดยจะทำการทดลองโดยการให้เป้าหมายเคลื่อนที่ผ่านด้านหน้าระบบเรดาร์ เช่น คนวิ่งผ่านหน้าระบบเรดาร์, รถยนต์ขับผ่านหน้าระบบเรดาร์ ดังรูปที่ 4.22 จากนั้นจึงนำสัญญาณไปประมวลผล จะได้ผลการประมวลสัญญาณในรูปแบบสเปกโตรแกรมเป็นกราฟ RTI (Range Time Intensity)



รูปที่ 4.22 การทดลองความเร็วโดยให้รถยนต์ขับผ่านหน้าระบบเรดาร์

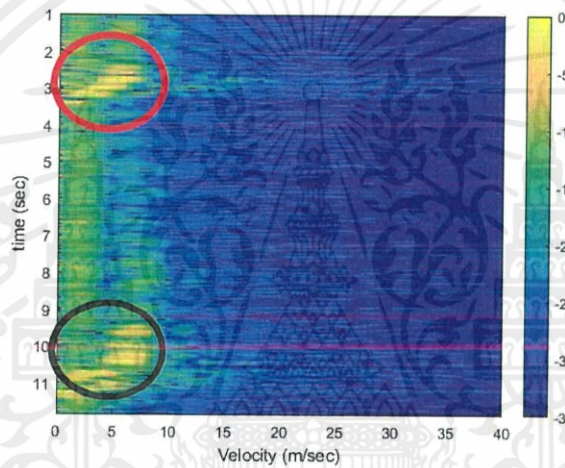
1) ทำการทดลองโดยตั้งระบบเรดาร์ไว้แล้วให้เป้าหมายซีรคจ็กรยานยนต์ผ่านตัวระบบ ก่อนจะขีวนกลับมาผ่านหน้าตัวระบบอีกรอบในทิศทางตรงกันข้ามกับทางเดิมด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 20 km/hr หรือ เท่ากับ 5.5 m/s จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของเป้าหมายซีรคจ็กรยานยนต์ไปกลับ

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าการตรวจจับเป้าหมายที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนประมาณ 6 m/s ณ วินาทีที่ 6 (วงกลมสีแดง) ก่อนจะหลุดจากการตรวจจับของระบบไป และกลับเข้ามาในกรอบการตรวจจับอีกครั้ง ณ วินาทีที่ 23 (วงกลมสีดำ) ด้วยความเร็วเท่าเดิมและลดลงเมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ผ่านไปวินาทีที่ 25

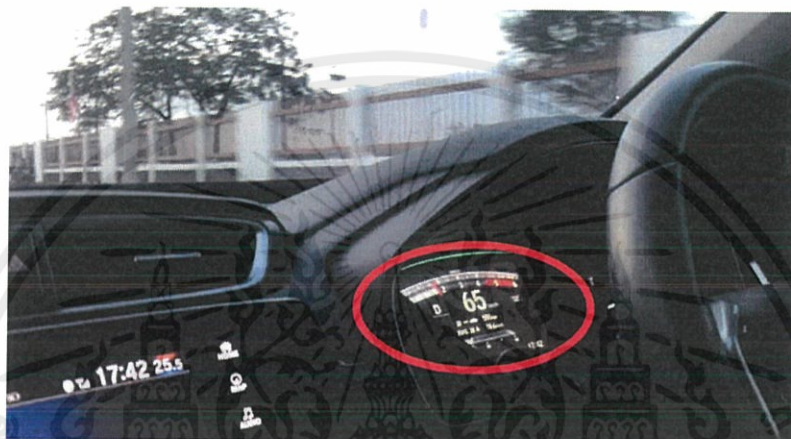
2) ทำการทดลองนำระบบไปตรวจจับความเร็วของรถยนต์ที่เคลื่อนที่ผ่านไปมาบนเส้นทางภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.24 เป็นการตรวจจับรถยนต์สองคันที่ขับตามกันมาผ่านระบบเรดาร์



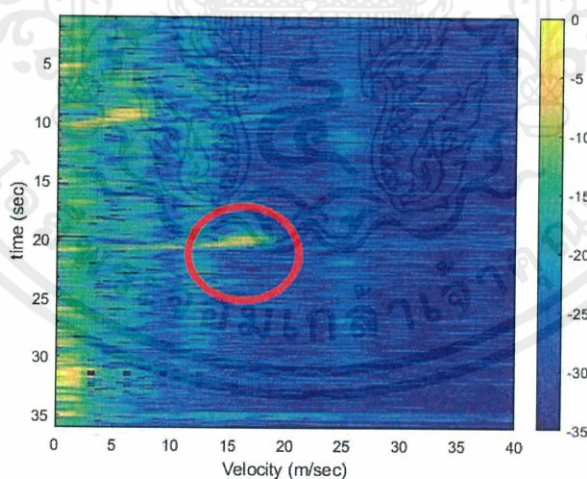
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของรถยนต์บนถนน

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าการตรวจจับรถยนต์คันแรกได้ตั้งแต่เริ่มทำการบันทึกสัญญาณ โดยรถยนต์คันนี้เคลื่อนที่มาด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 7.5 m/s (วงกลมสีแดง) ก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านระบบเรดาร์ไปในวินาทีที่ 3 ณ วินาทีที่ 8 จึงตรวจการเคลื่อนที่ของรถยนต์อีกคันที่เคลื่อนผ่านด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 8 m/s (วงกลมสีดำ) ก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านระบบเรดาร์ไปในวินาทีที่ 11

3) ทำการทดลองโดยการนำระบบเรดาร์ไปตรวจจับรถยนต์ที่ทางผู้จัดทำได้มีการขับเอง โดยได้บันทึกค่าความเร็วของรถยนต์ในขณะที่วิ่งผ่านเรดาร์ด้วยความเร็วที่ 65 km/hr แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 และแสดงผลลัพธ์ของการประมวลผลสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ค่าความเร็วของรถยนต์ขณะวิ่งผ่านเรดาร์



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความเร็วและเวลาของรถยนต์ที่วิ่งผ่านเรดาร์

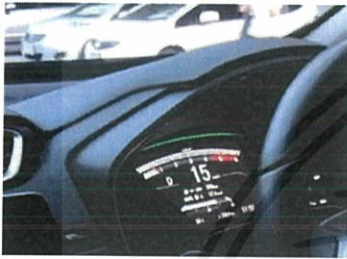
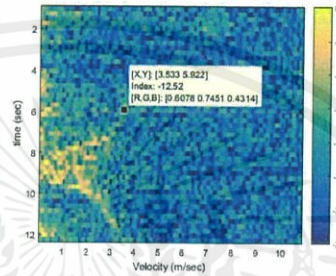

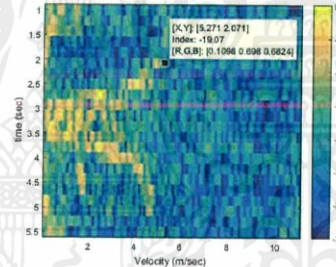

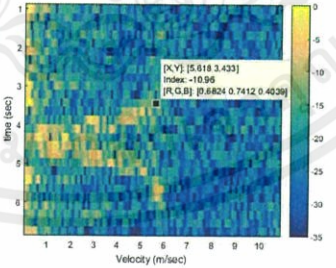
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าการตรวจจับรถยนต์ที่ผู้จัดทำเป็นคนขับเองซึ่งได้เคลื่อนที่ผ่านระบบเรดาร์ไปในวินาทีที่ 20 ด้วยความเร็วประมาณ 65 km/hr หรือ 18 m/s ก่อนที่จะเคลื่อนที่ออกจากกรตรวจจับไป


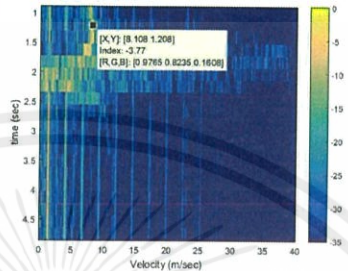

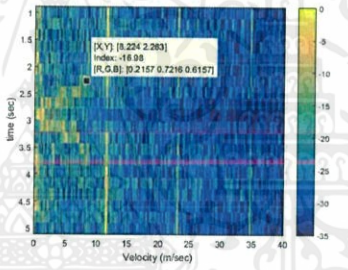

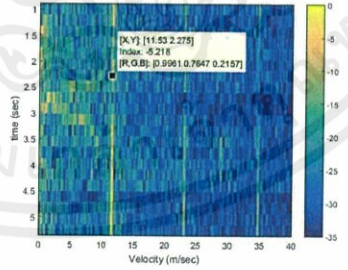
จากการทดลองนั้นผู้ทดลองสังเกตและอ่านค่าผลของการทดลองในบริเวณที่มีการเริ่มต้นจับสัญญาณได้ กล่าวคือบริเวณช่วงเวลาแรกที่แสดงสเปกโตรแกรม (สีเหลือง) ขึ้น โดยพิจารณาเลือกความเร็วบริเวณนั้นเป็นความเร็วที่ได้จากการทดลอง แสดงภาพของความเร็วที่สังเกตได้ ผลของการทดลอง (สเปกโตรแกรม) และผลการอ่านค่าสเปกโตรแกรมได้ดังตารางที่ 4.1




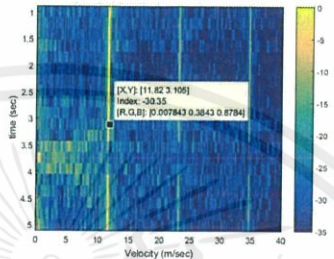
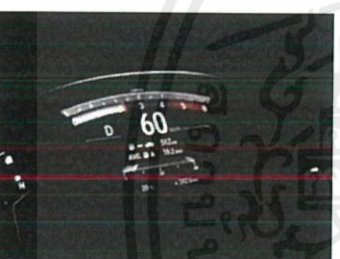
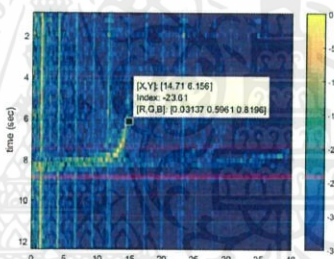
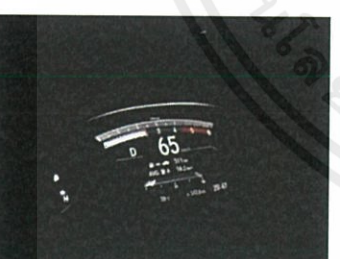
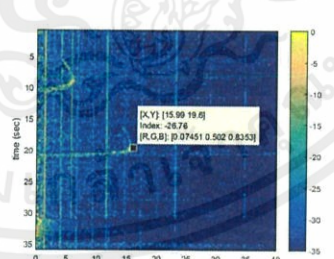
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดความเร็วด้วยรถยนต์ที่ความเร็วต่าง ๆ

ภาพความเร็วที่สังเกตเห็น	ความเร็วที่สังเกตเห็น	ภาพสเปกโตรแกรม	ความเร็วที่อ่านได้	ความผิดพลาด
	15 km/h (4.12 m/s)		3.53 m/s	14.32 %
	22 km/h (6.11 m/s)		5.27 m/s	13.75 %
	25 km/h (6.94 m/s)		5.62 m/s	19.02 %

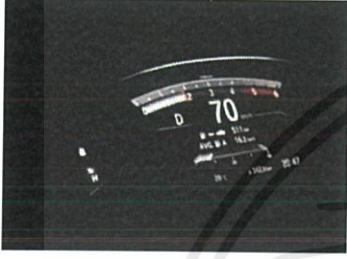
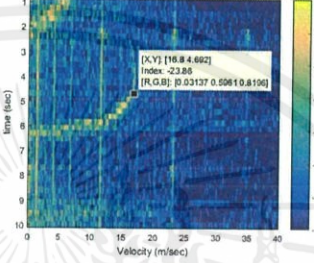
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพความเร็วที่สังเกตได้	ความเร็วที่สังเกตได้	ภาพสเปกโตรแกรม	ความเร็วที่อ่านได้	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	30 km/h (8.30 m/s)		8.11 m/s	2.29%
	36 km/h (10 m/s)		8.22 m/s	17.80 %
	45 km/h (12.50 m/s)		11.53 m/s	7.76 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพความเร็วที่สังเกตได้	ความเร็วที่สังเกตได้	ภาพสเปกโตรแกรม	ความเร็วที่อ่านได้	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	48 km/h (13.30 m/s)	 <p>[X,Y] [11.82 3.105] Index: -33.25 [R,G,B] [0.007843 0.3843 0.8794]</p>	11.82 m/s	11.12 %
	60 km/h (16.67 m/s)	 <p>[X,Y] [14.71 6.156] Index: -23.81 [R,G,B] [0.03137 0.5961 0.8196]</p>	14.71 m/s	11.76 %
	65 km/h (18.06 m/s)	 <p>[X,Y] [15.99 19.8] Index: -26.76 [R,G,B] [0.07451 0.502 0.8253]</p>	15.59 m/s	13.67 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

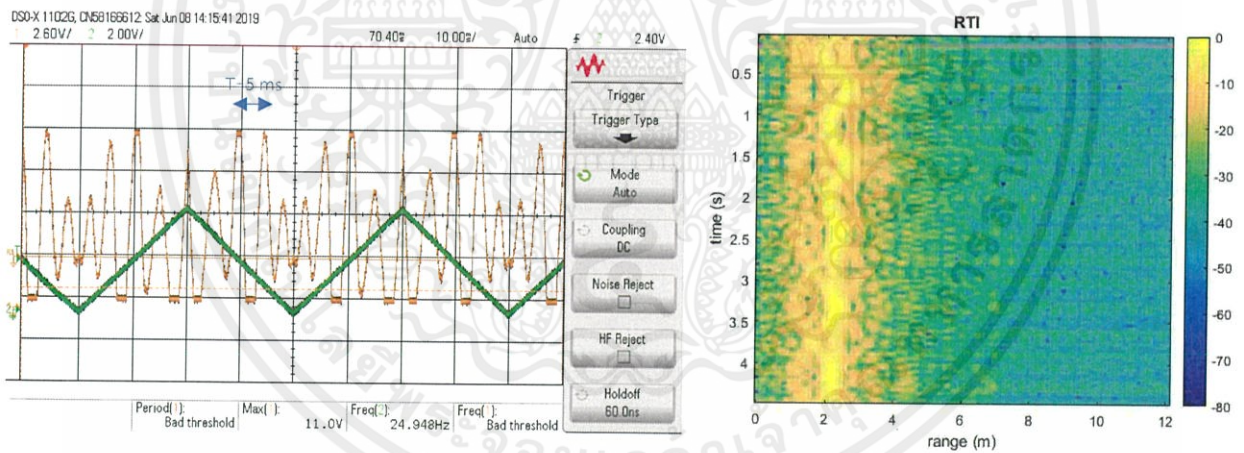
ภาพความเร็วที่สังเกตได้	ความเร็วที่สังเกตได้	ภาพสเปกโตรแกรม	ความเร็วที่อ่านได้	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	70 km/h (19.44 m/s)		16.60 m/s	14.60 %

4.3.2 ผลการทดลองตรวจจับระยะของเป้าหมายด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่

สำหรับการทดลองในเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ เพื่อตรวจจับระยะทางจะใช้ผลการประมวลสัญญาณในรูปสเปกโตรแกรมเป็นกราฟ RTI (Range Time Intensity) และสัญญาณเอาต์พุตในโดเมนเวลาเพื่อคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณ โดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองคือคนถือแผ่นบอร์ดหุ้มด้วยกระดาษฟรอยด์อลูมิเนียมหันหน้าเข้าตัวเรดาร์ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตอบสนองได้ดีกว่ากับวัตถุที่มีความเป็นโลหะ โดยจะทดลองที่ระยะห่างจากรีดาร์ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เมตรตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.28 – 4.33



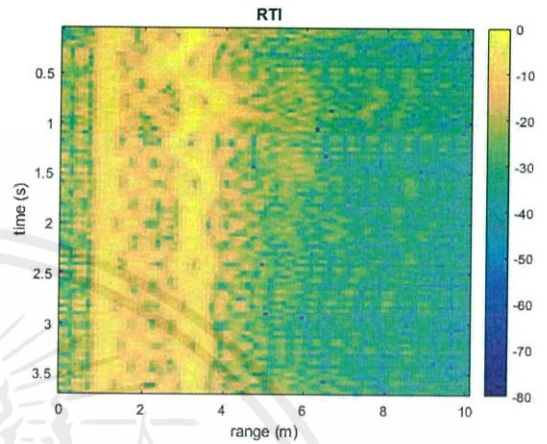
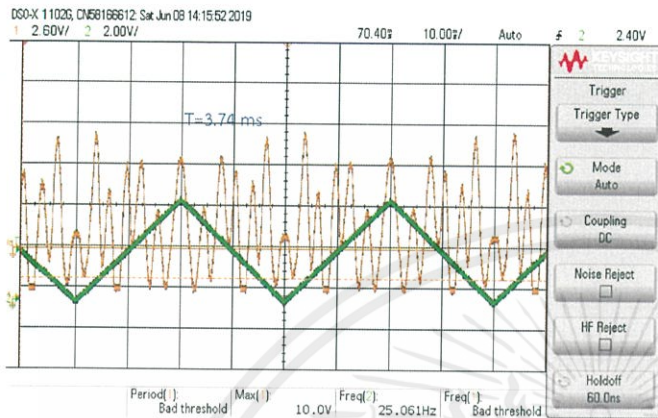
รูปที่ 4.27 การทดลองระยะทางโดยใช้คนถือแผ่นบอร์ดหุ้มด้วยกระดาษฟรอยด์คลุมนิยาม
หันหน้าเข้าตัวเรดาร์



(ก) สัญญาณเอาต์พุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 5 ms เทียบ
กับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดย
ส่วนสีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแกนสีด้านข้างคือ
เป้าหมายที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 2 เมตร

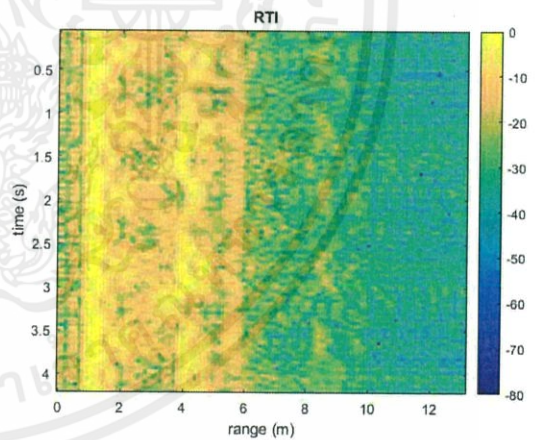
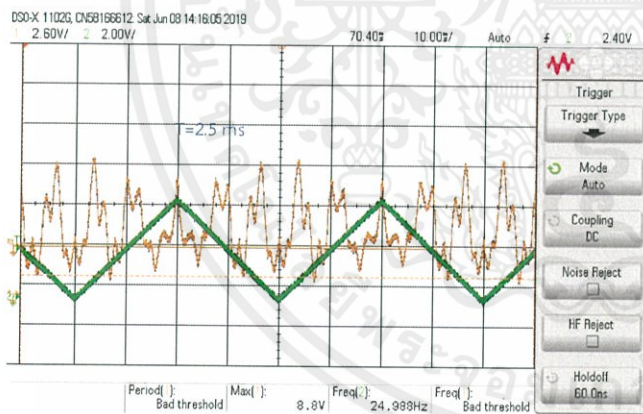
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 1 เมตรจากเรดาร์



(ก) สัญญาณเอادتพุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 3.74 ms
 เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดยส่วน
 สีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแถบสีด้านข้างคือเป้าหมาย
 ที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 1 และ 3 เมตร

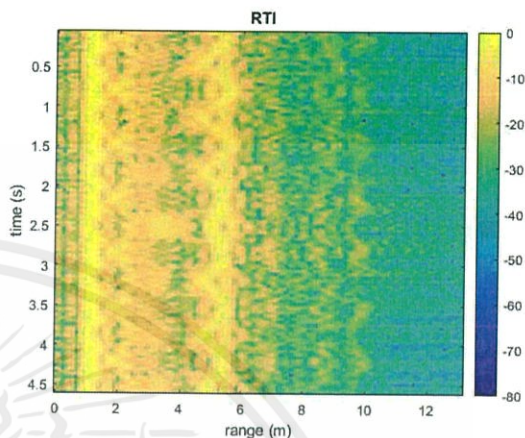
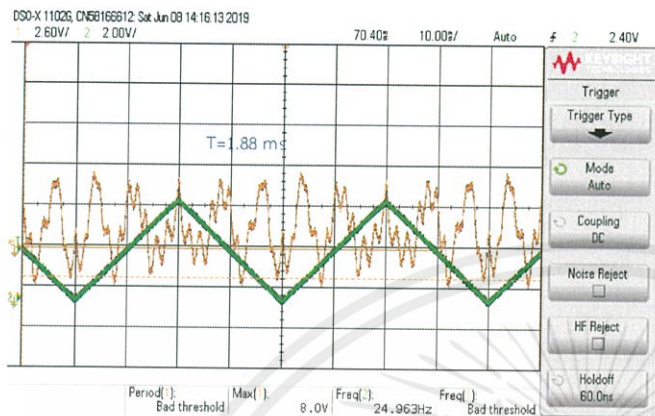
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 2 เมตรจากเรดาร์



(ก) สัญญาณเอادتพุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 2.5 ms
 เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดยส่วน
 สีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแถบสีด้านข้างคือเป้าหมาย
 ที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 1 และ 4 เมตร

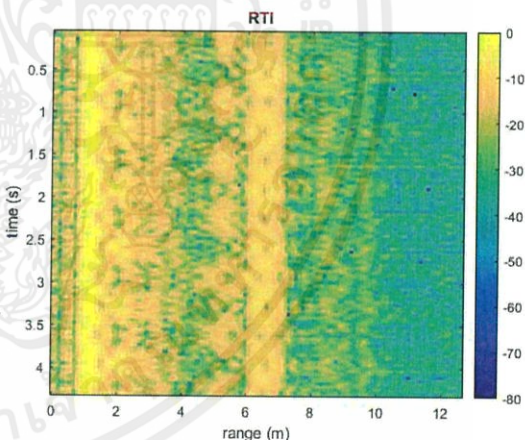
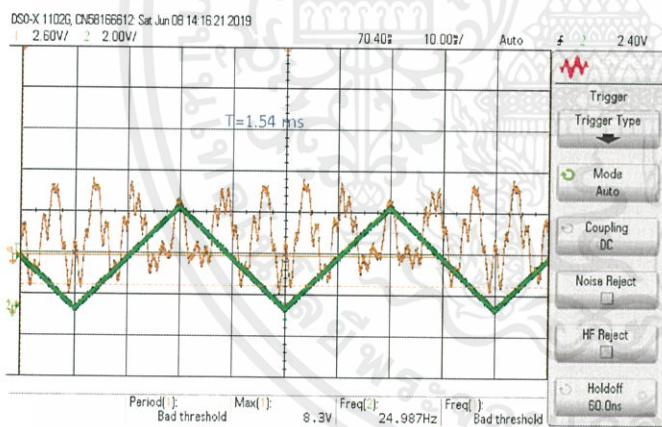
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 3 เมตรจากเรดาร์



(ก) สัญญาณเอาต์พุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 1.88 ms เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดยส่วนสีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแกนสีด้านข้างคือเป้าหมายที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 1 และ 5 เมตร

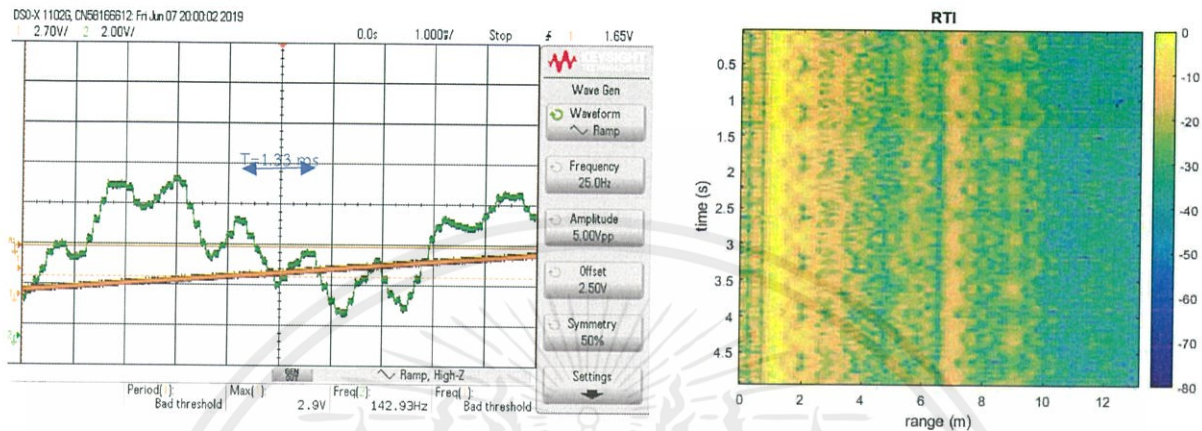
รูปที่ 4.31 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 4 เมตรจากรถอาร์



(ก) สัญญาณเอาต์พุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 1.54 ms เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดยส่วนสีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแกนสีด้านข้างคือเป้าหมายที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 1 และ 6 เมตร

รูปที่ 4.32 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 5 เมตรจากรถอาร์

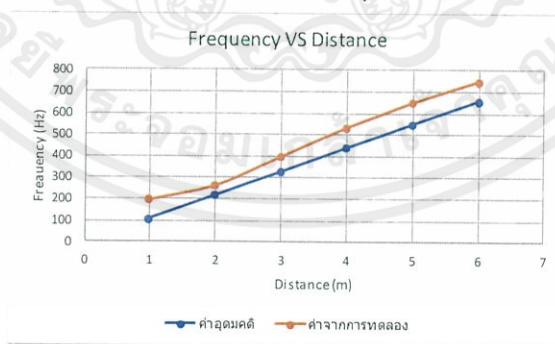


(ก) สัญญาณเอาต์พุต (สีเขียว) ที่มีคาบเวลา 1.33 ms เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมอินพุต (สีส้ม)

(ข) สเปกโตรแกรมของระยะเทียบกับเวลา โดยส่วนสีเหลืองที่ค่าน้อยสุดตามแกนสีด้านข้างคือเป้าหมายที่ตรวจจับได้ อ่านค่าได้ที่ระยะ 1 และ 7 เมตร

รูปที่ 4.33 ผลการทดลองตรวจจับระยะ 6 เมตรจากรถคาร์

จากผลการทดลองจึงคำนวณค่าความถี่สัญญาณเอาต์พุตจากคาบเวลาที่วัดได้ตามสมการ $f = \frac{1}{T}$ หลังจากนั้นจึงนำค่าความถี่ที่คำนวณได้จากคาบของสัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดมาพลอตกราฟเทียบกับค่าความถี่จากระยะทางจากรถคาร์ที่คำนวณตามสมการที่ 2.31 โดยให้ $B = 330 \text{ MHz}$ และ $T = 40 \text{ ms}$ ได้กราฟดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าความถี่ของระยะทางจากรถคาร์

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดของปฏิญาณนิพนธ์และรวมไปถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ที่ผู้จัดทำมีต่อปฏิญาณนิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการแก้ไขของผู้จัดทำเองหรือผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผล

จากการทำปฏิญาณนิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งการสรุปผลออกได้เป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนการออกแบบต้นแบบระบบเรดาร์ ส่วนการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ ส่วนการทดสอบระบบเรดาร์และส่วนชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้

5.1.1 ส่วนการออกแบบต้นแบบระบบเรดาร์

การออกแบบต้นแบบระบบเรดาร์ มีการออกแบบให้มีการวางอุปกรณ์และวงจรการทำงานทั้งหมดบนแผ่นอะคริลิกเพื่อให้สะดวกกับการนำไปใช้งานในสถานที่ต่างๆ การเปิด - ปิดระบบเรดาร์สามารถทำได้ผ่านการควบคุมของสวิตช์ (เปิด - ปิด) ของกล่องใส่ถ่านแบตเตอรี่และสามารถควบคุมวงจรถ่ายสัญญาณภาคพื้นฐานได้ด้วยการเลื่อนสวิตช์ที่อยู่ในวงจรเพื่อให้ใช้งานได้ทั้ง 2 โหมดการทำงานของเรดาร์ คือโหมดเคลื่อนต่อเนื่อง เพื่อตรวจจับความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่และโหมดเคลื่อนต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ เพื่อตรวจจับระยะของวัตถุที่เคลื่อนที่ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามการออกแบบที่ต้องการ

5.1.2 ส่วนการประมวลผลสัญญาณเรดาร์

ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลสัญญาณที่มีการพัฒนาให้มีการประมวลผลสัญญาณในส่วนของเรดาร์เคลื่อนต่อเนื่องเพื่อตรวจจับความเร็วของเป้าหมายและเรดาร์เคลื่อนต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่เพื่อตรวจจับระยะทางของเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ การประมวลผลของสองโหมดจะต่างกันในส่วนการนำสัญญาณผลลัพธ์ที่ออกจากวงจร Video Amplifier มาประมวลผลด้วยอัลกอริธึมที่ชื่อ FFT (Fast Fourier Transform Algorithm) โดยโหมดเคลื่อนต่อเนื่องจะนำสัญญาณผลลัพธ์มาวิเคราะห์ข้อมูลทางความถี่ที่นำค่าความถี่ต่อเพลอร์มาคำนวณหาความเร็ว ส่วนโหมดเคลื่อนต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่จะนำสัญญาณผลลัพธ์ซึ่งจะคงเหลือแต่ส่วนของความถี่ปีตมาประมวลผลโดยตรงเพื่อระบุตำแหน่งของเป้าหมายจากค่าความเข้ม

ของสัญญาณที่สูงกว่าสัญญาณรบกวน ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผลจะแสดงเป็นสเปกโตรแกรมที่บอกความเร็วและระยะทางเทียบกับเวลาได้ใกล้เคียงกับค่าตามความเป็นจริง

5.1.3 ส่วนการทดสอบระบบเรดาร์

การทดสอบระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ตรวจจับความเร็วของเป้าหมายและเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ที่ตรวจจับระยะทางของเป้าหมาย ซึ่งจากผลการทดลองในบทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่าผลการทดสอบของการตรวจจับความเร็วมีความแม่นยำใกล้เคียงกับความเร็วที่สังเกตได้ทั้ง 3 รูปแบบ คือ ความเร็วจากคนวิ่ง ความเร็วจากรถจักรยานยนต์ และความเร็วจากรถยนต์ ที่มีความเร็วจากน้อยไปมากตามลำดับ โดยสำหรับการทดสอบการตรวจจับความเร็วจากรถยนต์สามารถสรุปได้ว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดร้อยละ 12.61% จากการทดสอบระบบ ในขณะที่ผลการทดสอบของการตรวจจับระยะทางจะสามารถตรวจจับได้เมื่อวัตถุเป้าหมายหยุดนิ่งอยู่หน้าเรดาร์ พบว่าเมื่อแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคปจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ให้ความถี่ห่างจากค่าตามทฤษฎีประมาณ 100 Hz ส่งผลให้ผลจากสเปกโตรแกรมอ่านค่าระยะทางได้เกินจากระยะที่วัดจริงประมาณ 1 เมตร และคาดว่าเป็นผลมาจากส่วนความถี่ต่ำ 125 Hz แทรกมาในทุกสัญญาณจากผลการทดลองส่งผลให้ในสเปกโตรแกรมมีส่วนของระยะ 1 เมตรแทรกมาด้วยเนื่องจากระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับมีค่าไม่มากพอจนส่งผลให้มีส่วนความถี่ต่ำแทรกมา และสัญญาณเอาต์พุตมีแอมพลิจูดที่อ่อนลงมากหลังจากระยะ 6 เมตร จึงสรุปได้ว่าระบบเรดาร์โหมดคลื่นต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่สามารถตรวจจับระยะทางของเป้าหมายหยุดนิ่งได้ในระยะไม่เกิน 6 เมตร และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศไม่เพียงพอ

5.1.4 ส่วนชุดฝึกเพื่อการเรียนรู้

จากภาพรวมในการทำงานของระบบสามารถสรุปได้ว่าต้นแบบระบบเรดาร์นี้สามารถใช้เป็นระบบจำลองเพื่อนำไปพัฒนาต่อเป็นชุดการศึกษาเพื่อการเรียนรู้สำหรับการเรียนการสอนเรื่องระบบเรดาร์พื้นฐานโดยใช้องค์ความรู้ในภาควิชาวิศวกรรมสื่อสารโทรคมนาคมได้ โดยทางคณะผู้จัดทำได้จัดทำเอกสารประกอบการทดลองเรื่องเรดาร์กระป๋องขนาดเล็กกับการตรวจจับความเร็วและระยะทางระยะใกล้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมสื่อสารโทรคมนาคมหรือบุคคลอื่น ๆ ที่มีความสนใจ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบระบบทั้งการตรวจจับความเร็วและระยะทาง พบว่าระบบเรดาร์ในปริภูมิพหุคูณฉบับนี้สามารถนำไปใช้เพื่อศึกษาและทดลองระบบเรดาร์ขนาดเล็กในระยะใกล้ได้ดีใน ส่วนของการตรวจจับความเร็วของวัตถุเป้าหมายที่เคลื่อนที่โดยใช้ความถี่กลางค่าใดค่าหนึ่งในช่วง ของ ISM Band หากต้องการนำการตรวจจับความเร็วจากระบบต้นแบบนี้ไปประยุกต์หรือเพิ่มเติมจากระบบเดิม สามารถทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาส่วนที่ต้องปรับแก้ ทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำของค่าความเร็วของวัตถุเป้าหมายที่ตรวจจับ ได้จากการ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับระยะจากตัวเรดาร์ถึงเป้าหมาย ควรหาวิธีเพิ่มแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ใช้ในระบบ เนื่องจากการทำให้เรดาร์ส่งสัญญาณ Wide Band หรือแบนด์กว้าง จะมีประสิทธิภาพต่อการตรวจจับระยะทางมากกว่าเรดาร์แบบ Narrow Band หรือแบนด์แคบ โดยอาจเปลี่ยนองค์ประกอบ RF เช่น VCO ให้สามารถสร้างสัญญาณที่มีความถี่ช่วงกว้างขึ้นกว่าเดิมได้ อาจปรับแก้จากตัวสายอากาศทั้งฝั่งส่งและรับให้มีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ที่ใช้งาน ดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสามารถปรับแก้ได้ทั้งระยะของลวดโมโนโพลจากกันกระป๋อง ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับและความยาวของลวด หรืออาจเปลี่ยนองค์ประกอบที่ใช้เป็นสายอากาศจากกระป๋องอลูมิเนียมเป็นวัสดุอื่นที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่า

บรรณานุกรม

- [1] Dr. Gregory L. Charvat. "Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imaging." [http : //ocw.Mit.edu/ resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/#](http://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/#).
- [2] G de Peralta. "Coffee Can Radar: Detection and Jamming." [https://web.wpi.edu /Pubs/E-project/Available/E-project-032317-214929/unrestricted/coffeecanradar.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032317-214929/unrestricted/coffeecanradar.pdf).
- [3] Gregory L. Charvat. "MIT IAP 2011 Laptop Based Radar:Block Diagram, Schematics,Bill of Material,and Fabrication Instructions." https://ocw.mit.edu /resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/ projects /MITRES_LL_003IAP11_proj_in.pdf.
- [4] JH Williams. "Modular System RF Design." https://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/lecture-notes /MITRES_LL_003IAP11_lec03.pdf.
- [5] "Video Amplifier." <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Video+Amplifier>.
- [6] Johan Svensson. "High Resolution Frequency Estimation in an FMCW Radar Application." <https://liu.diva-portal.org/ smash/get/ diva2:1217060 /FULLTEXT01.pdf>.
- [7] "Coffee-Can Radar." <https://www.slideshare.net/yousseframzy/coffee-can-radar>.
- [8] "XR-2206." https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.
- [9] Gregory Rehm. "How To Build A Tin Can Waveguide WiFi Antenna." <http://www.turnpoint.net/wireless/cantennahowto.html>.
- [10] นิวัตติ เนียมพลอย. "หลักการทํางานของเรดาร์." <https://nniwat.wordpress.com /2010/07/01/หลักการทํางานเบื้องต้น>.
- [11] "เรดาร์." <https://th.wikipedia.org/wiki/เรดาร์>.
- [12] Christian Wolff. "Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar." www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html.

- [13] “อิเล็กทรอนิกส์ ออสซิลเลเตอร์.” https://th.wikipedia.org/wiki/อิเล็กทรอนิกส์_ออสซิลเลเตอร์.
- [14] ลอเรนซ์ พี ฮุยสมแมน. (2544). *การออกแบบวงจรกรองแอนะล็อก Active and Passive Analog Filter Design*. แปลและเรียบเรียงโดย จิรยุทธ์ มัทธนกุล. กรุงเทพฯ : แมคกรอฮิล.
- [15] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. (2537). *วิศวกรรมสายอากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- [16] Van. Valkenburg. (1982). *Analog filter design*. The united start of America.
- [17] Pozar. David M. (2005). *Microwave Engineering*. America : Phoenic Color.
- [18] “Low Supply Current Output Full Swing Operational Amplifiers.” <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/lmr821g-e-372246.pdf>
- [19] “LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers.” <http://www.ti.com/lit/ds/snosc16d/snosc16d.pdf>.
- [20] Robert M. O'Donnell. “Introduction to Radar Systems.” <http://ocw.mit.edu/resources/res-ll-001-introduction-to-radar-systems-spring-2007/>.
- [21] Charvat Gregory L. (2014). *Small and short – range radar systems*. America: Boca Raton.
- [22] “Circular waveguides.” <https://www.qwed.eu/CircularWaveguides.pdf>.
- [23] Jean Burnikell. “S-parameters An introduction.” <http://www.polarinstruments.com>.
- [24] “Spatial frequency.” https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_frequency.
- [25] “Antenna Gain.” <http://www.antenna-theory.com/basics/gain.php>.
- [26] Kurt Peek. “Estimation and compensation of frequency sweep nonlinearity in FMCWRadar.” <https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/peek.pdf>
- [27] “Continuous wave and frequency modulation radar.” <https://nptel.ac.in/courses/101108056/module2/lecture4.pdf>
- [28] “Frequency – Modulation Continuous – Wave (FMCW).” <http://demonstrations.wolfram.com/FrequencyModulatedContinuousWaveFMCWRadar/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประมวลผลสัญญาณเรดาร์เพื่อตรวจจับระยะทาง

```

clear all;
close all;
%read the raw data .wave file here
[Y,FS] = audioread('fujiraya.mp4');
%constants
c = 3E8; %(m/s) speed of light
%radar parameters
Tp = 20E-3; %(s) pulse time
N = Tp*FS; %# of samples per pulse
fstart = 2370E6; %(Hz) LFM start frequency for example
fstop = 2480E6; %(Hz) LFM stop frequency for example
%fstart = 2402E6; %(Hz) LFM start frequency for ISM band
%fstop = 2495E6; %(Hz) LFM stop frequency for ISM band
BW = fstop-fstart; %(Hz) transmit bandwidth
f = linspace(fstart, fstop, N/2); %instantaneous transmit frequency
%range resolution
rr = c/(2*BW);
max_range = rr*N/2;
%the input appears to be inverted
trig = -1*Y(:,2);
s = -1*Y(:,1);
clear Y;
%parse the data here by triggering off rising edge of sync pulse
count = 0;
thresh = 0;
start = (trig > thresh);
for ii = 100:(size(start,1)-N)
    if start(ii) == 1 & mean(start(ii-11:ii-1)) == 0
        %start2(ii) = 1;
        count = count + 1;
        sif(count,:) = s(ii:ii+N-1);
        time(count) = ii*1/FS;
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%check to see if triggering works
% plot(trig,'.b');
% hold on;si
% plot(start2,'.r');
% hold off;
% grid on;
%subtract the average
ave = mean(sif,1);
for ii = 1:size(sif,1);
    sif(ii,:) = sif(ii,:) - ave;
end
zpad = 8*N/2;
%RTI plot
figure(10);
v = dbv(fft(sif,zpad,2));
S = v(:,1:size(v,2)/2);
m = max(max(v));
imagesc(linspace(0,max_range,zpad),time,S-m,[-80, 0]);
colorbar;
ylabel('time (s)');
xlabel('range (m)');
title('RTI without clutter rejection');
%2 pulse cancelor RTI plot
figure(20);
sif2 = sif(2:size(sif,1),:)-sif(1:size(sif,1)-1,:);
v = ifft(sif2,zpad,2);
S=v;
R = linspace(0,max_range,zpad);
for ii = 1:size(S,1)
    %S(ii,:) = S(ii,:).*R.^(3/2); %Optional: magnitude scale to range
end
S = dbv(S(:,1:size(v,2)/2));
m = max(max(S));
imagesc(R,time,S-m,[-80, 0]);
colorbar;
ylabel('time (s)');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
xlabel('range (m)');
title('RTI with 2-pulse cancelor clutter rejection');
```

ส่วนประมวลผลสัญญาณเรดาร์เพื่อตรวจจับความเร็ว

```
close all;
clear all;
%read the raw data .wave file here
[Y,FS] = audioread('mom65sec20.mp4'); %sound = 70s
%FS=2000;
%constants
c = 3E8; %(m/s) speed of light
%radar parameters
Tp = 0.02; %(s) pulse time
N = Tp*FS; %# of samples per pulse
fc = 2400E6; %(Hz) Center frequency (connected VCO Vtune to +5 for example)
%fc = 2495E6; %(Hz) Center frequency within ISM band (VCO Vtune to +3.2V)
%the input appears to be inverted
s = -1*Y(:,1);
%clear Y;
%creat doppler vs. time plot data set here
for ii = 1:round(size(s,1)/N)-1
    sif(ii,:) = s(1+(ii-1)*N:ii*N);
end
%subtract the average DC term here
sif = sif - mean(s);
zpad = 10*N/2;
%doppler vs. time plot:
v = dbv(fft(sif,zpad,2));
v = v(:,1:size(v,2)/2);
mmax = max(max(v));
%calculate velocity
delta_f2 = linspace(0, FS/2, size(v,2)); %(Hz)
lambda=c/fc;
velocity = delta_f2*lambda/2;
%calculate time
```

```
time = linspace(1, Tp*size(v,1),size(v,1)); %(sec)
%plot
imagesc(velocity,time,v-mmax,[-35, 0]);
colorbar;
xlim([0 40]); %limit velocity axis
xlabel('Velocity (m/sec)');
ylabel('time (sec)')
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง

เรดาร์กระป๋องขนาดเล็กกับการตรวจจับความเร็วและระยะทางระยะใกล้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจระบบเรดาร์ที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม
3. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจวงจรความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key
4. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจหลักการทำงานของสายอากาศ
5. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)
6. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna gain)
7. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)
8. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถใช้เครื่องมือทดสอบที่เกี่ยวข้องได้

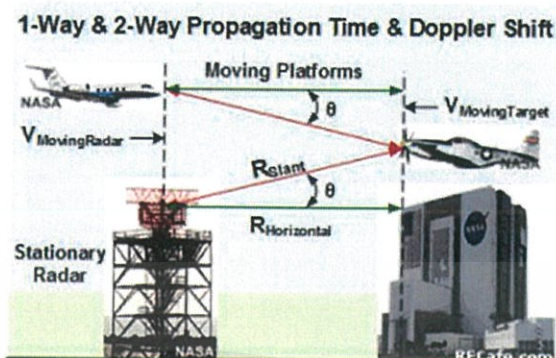
ทฤษฎีเบื้องต้น

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์ (RADAR)

เรดาร์ (RADAR) เป็นระบบที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเครื่องมือในการระบุระยะ (range) ความสูง (altitude) รวมถึงทิศทางหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ เดิมทีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1941 คำว่า "เรดาร์" ในภาษาอังกฤษสะกดด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ คือ RADAR และย่อมาจากคำว่า Radio Detection and Ranging ระบบเรดาร์โดยทั่วไปประกอบด้วยเครื่องส่งสัญญาณที่ผลิตสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกส่งผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ โดยสายอากาศ เมื่อสัญญาณนี้กระทบวัตถุใดๆ จะได้รับการสะท้อนหรือแผ่กระจายในหลายทิศทาง สัญญาณสะท้อนนี้ได้รับจากสายอากาศเรดาร์ซึ่งส่งไปยังเครื่องรับซึ่งจะมีการประมวลผลเพื่อกำหนดสถิติทางภูมิศาสตร์ของวัตถุ ระยะถึงวัตถุจะคำนวณได้โดยการคำนวณเวลาที่สัญญาณใช้เดินทางจากเรดาร์ไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับ และจะใช้ Doppler Effect ในการทดสอบความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่

1.1 หลักการทำงานของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะทำงานด้วยหลักการเบื้องต้นที่คล้ายคลึงกันโดยเรดาร์จะทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยการส่งคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ไมโครเวฟซึ่งถือว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระจายสู่บรรยากาศด้วยความเร็วแสงและมีผลกระทบต่อวัตถุที่อยู่ตามแนวเส้นทางเดินของมัน โดยเมื่อตกกระทบวัตถุใดๆ จะมีผลทำให้เกิดการกระจาย การเป็ยงเบน และการหักเหของคลื่น ซึ่งเรานำเอาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาความเร็วและระยะทางของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การทำงานของเรดาร์ที่หยุดนิ่งกับเป้าหมายที่เคลื่อนที่

1.2 Continuous Wave (CW) Radar

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบไม่มีการมอดูเลตจะปล่อยความถี่คงที่และค่าแอมพลิจูดคงที่ สัญญาณสะท้อนที่ได้รับนั้นจะมีความถี่เท่าเดิมหรือจะเลื่อนไปตามความถี่ Doppler โดยเรดาร์ CW ที่ใช้ในการวัดความถี่ Doppler นี้เรียกว่าเรดาร์ Doppler การวัดเวลารันใหม่ไม่จำเป็นต้องมีในเรดาร์ Doppler เพื่อการทดสอบความเร็วเนื่องจากเรดาร์ CW สามารถตรวจจับความเร็วของวัตถุผ่านทางผล Doppler เท่านั้น ไม่สามารถกำหนดระยะทางหรือแยกแยะเป้าหมายที่ต่างกันไปในทิศทางเดียวกันได้

เรดาร์ CW จะประเมินความต่างเฟส ϕ ระหว่างสัญญาณที่ส่งไปและสัญญาณที่ได้รับ ขนาดของความแตกต่างของเฟสจึงเท่ากับอัตราส่วนของความยาวคลื่นของสัญญาณส่งต่อระยะทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางคูณด้วยองศาของวงกลมในหน่วยเรเดียน ($2 \cdot \pi$) ถ้าระยะห่างจากวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงจะถือว่าเป็นค่าคงที่และสามารถคำนวณความต่างเฟสได้ดังสมการที่ 1.1

$$\phi = \frac{2\pi f_c R}{c} \quad (1.1)$$

โดย ϕ คือความต่างเฟส R คือระยะทางระหว่างสายอากาศและวัตถุ c คือความเร็วแสง และ f_c คือค่าความถี่กลางที่ใช้ในระบบ

ถ้าวัตถุเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่จากจุดเริ่มต้น R_i ดังนั้นจะได้ตำแหน่งของวัตถุดังกล่าวเมื่ออิงกับความเร็วและเวลาดังสมการที่ 1.2

$$R = vt + R_i \quad (1.2)$$

ดังนั้นเฟสที่สะท้อนกลับจากวัตถุเป้าหมายเคลื่อนที่หรือเฟสกระจายก็จะเปลี่ยนไปตามเวลาด้วยเช่นกัน โดยหากแทนที่สมการที่ 1.3 ลงในสมการ 1.2 จะได้ฟังก์ชันของเฟสที่เปลี่ยนไปตามเวลาดังนี้

$$\varphi(t) = \frac{2\pi f_c (vt + R_i)}{c} \quad (1.3)$$

Doppler คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของเฟสกระจายตามเวลาและอัตราการเปลี่ยนแปลงของเฟสก็คือการเลื่อนทางความถี่หรือ Frequency Shift ซึ่งจะปรากฏอยู่ในสมการ Doppler โดยการแทนค่าสมการ $f_c = c/\lambda_c$ ที่มี λ_c เป็นความยาวคลื่นของความถี่กลางที่ใช้ในระบบลงในฟังก์ชันของเฟสที่เปลี่ยนตามเวลาจะได้ค่า Δf_D หรือค่าความถี่ที่เลื่อนไปในหน่วย Hertz ดังสมการที่ 1.4

$$\Delta f_D = \frac{2v}{\lambda_c} \quad (1.4)$$

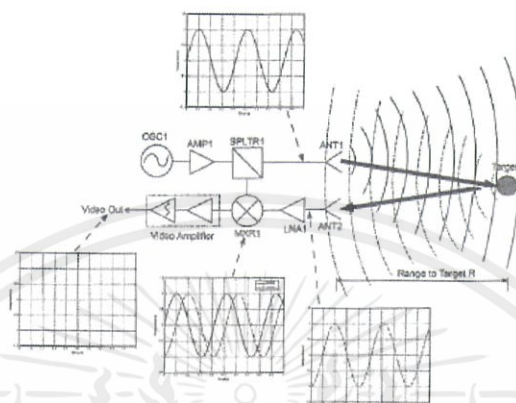
ตัวอย่างการคำนวณหาความถี่ Doppler จากความเร็ววัตถุความเร็วเช่น พิจารณาเรดาร์ CW Doppler ที่ส่งสัญญาณความถี่กลาง $f_c = 2.4 \text{ GHz}$ หากวัตถุเป้าหมายกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 MPH เข้าสู่เรดาร์โดยตรง ก็จะได้ผลลัพธ์ทางสายอากาศฝั่งรับเป็นสัญญาณโซนูซอยด์ที่มีส่วนของความถี่ Doppler $\Delta f_D = 34 \text{ Hz}$

1.3 สถาปัตยกรรมของ CW RADAR

ระบบเรดาร์ CW Doppler ส่วนใหญ่จะสร้างตามสถาปัตยกรรมของเรดาร์แบบ Phase Coherent ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งอาศัยหลักการที่คลื่นพาห์แบบต่อเนื่อง (CW carrier) ถูกส่งไปกระทบและสะท้อนกลับจากเป้าหมายที่หยุดนิ่งทำให้ได้สมการความล่าช้าของเฟสซึ่งแปรผันตรงกับระยะทางจากเรดาร์ถึงเป้าหมายดังสมการที่ 1.5

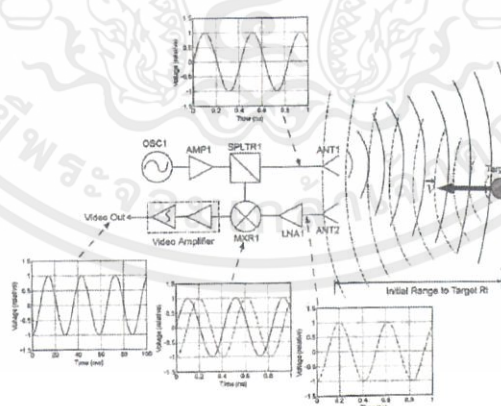
$$\varphi_R = \frac{2\pi f_c R}{c} \quad (1.5)$$

เพียงแต่ในกรณีของเรดาร์ CW Doppler วัตถุเป้าหมายจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว \vec{v} ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ \vec{v} คือเวกเตอร์โพเจกชันความเร็วของวัตถุเป้าหมายในทิศตั้งฉากต่อลำคลื่นจากเรดาร์



รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์ CW แบบ Phase Coherent

โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้สถาปัตยกรรมของเรดาร์ CW Doppler ดังรูปที่ 3 โดยมีบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4 ซึ่ง OSC1 ประกอบไปด้วย VCO ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุม (VCO) ทำหน้าที่ bias ที่ความถี่กลาง 2.4 GHz เมื่อถูกบ่อนอินพุตจาก Function Generator เป็นสัญญาณไฟตรง (DC) ขนาด 2 V โดยความถี่ 2.4 GHz อยู่ในแถบ ISM band ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ในด้านอุตสาหกรรมการแพทย์และวิทยาศาสตร์ เอาต์พุตของ VCO ถูกลดขนาด

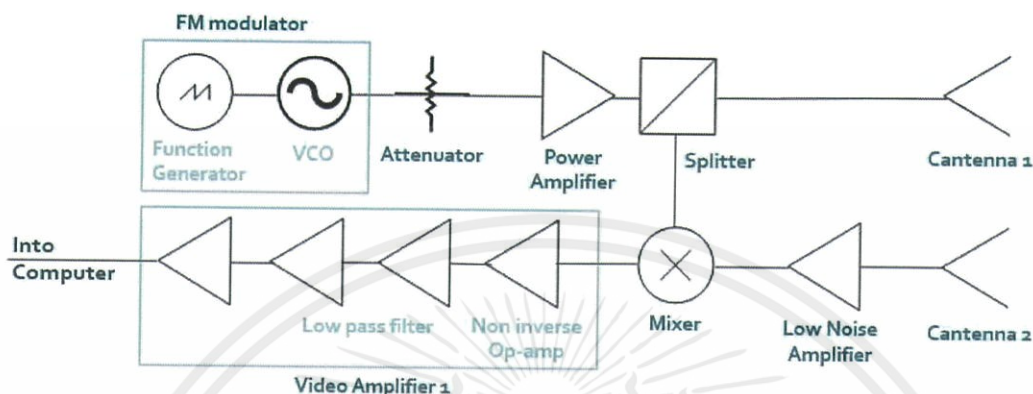


รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์ CW Doppler

ลงเล็กน้อยจากตัว attenuator จากนั้นถูกขยายด้วย Power Amplifier ซึ่งเป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำที่สามารถรับกำลังไฟ 18.5 dBm ตัว Attenuator จึงทำหน้าที่ป้องกัน PA1 จากการอิมิตัวจากสัญญาณอินพุตที่มีกำลังสูงเกิน เอาต์พุตของ Power Amplifier ถูกป้อนเข้าไปในตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Splitter เพื่อแยกสัญญาณ ครึ่งหนึ่งของเอาต์พุตของ Splitter ถูกป้อนเข้ากับสายอากาศส่ง Antenna1 ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะถูกป้อนเข้าไปในของเครื่องผสมสัญญาณ (Mixer)



รูปที่ 1.4 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์ CW ที่ใช้ในโครงการ

Cantenna1 ถือเป็นสายอากาศแบบ Circular Waveguide ที่มีความถี่ 2.4 GHz สายอากาศนี้สร้างจากกระป๋องอลูมิเนียมขนาดเล็ก มีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 14.54 dBi และค่า HPBW (Half Power Beam Width) ประมาณ 64 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบ

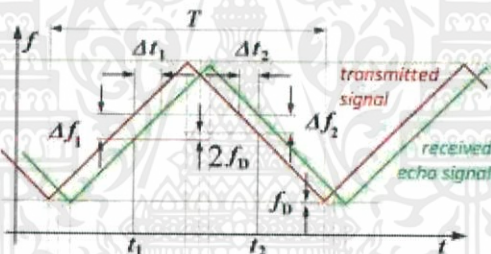
Cantenna1 แผ่กระจายสัญญาณไปยังเป้าหมายและพลังงานที่สะท้อนจะจัดกระจายกลับมาจะถูกรวบรวมโดย Cantenna2 โดยมี Low Noise Amplifier เป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุตจาก Cantenna2 แล้วจึงป้อนเข้าเข้าไปในพอร์ต RF (Radio Frequency) ของ Mixer โดยในส่วนพอร์ต LO (Local Oscillator) ของ Mixer จะถูกป้อนสัญญาณจาก Splitter สัญญาณเอาต์พุตจาก Mixer จึงเป็นการคูณคลื่นพาห์ CW ด้วยสัญญาณที่รับได้ เป็นการทำให้ระบบเรดาร์นี้เป็นแบบ Phase Coherent

สัญญาณเอาต์พุตของ Mixer ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ audio หรือเป็นสัญญาณเสียง จะผ่านวงจร Video Amp1 ซึ่งจะรวมถึงการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายไม่กลับเฟสตามด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำลำดับที่ 2 แบบ Butterworth ที่มีความถี่ cut off ประมาณ 15 kHz โดยสร้างจากไอซีแบบ quad op amp เอาต์พุตของ Video Amp1 จะถูกป้อนเข้าไปในสายสัญญาณเสียงขนาด 3.5 มม. ซึ่งต่อเข้ากับพอร์ตอินพุตเสียงของคอมพิวเตอร์ซึ่งสัญญาณเสียงจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล โดยวงจรที่อยู่ร่วมกับวงจร Video Amplifier คือ Function Generator และส่วน DC bias เพื่อเลือกความถี่ให้ระบบเรดาร์ทำงานในโหมด CW

2. Frequency Modulated Continuous Wave Radar (FMCW)

FMCW Radar (Frequency Modulated Continuous Wave Radar) เป็นเรดาร์แบบคลื่นต่อเนื่องที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในระหว่างการส่งและรับสัญญาณ โดยสัญญาณจะถูกมอดูเลตทางความถี่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถวัดค่าเวลาในการทำงานหรือรันไทม์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (หรือเฟส) เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระยะถึงเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ได้

ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบง่ายๆ โดยไม่มีการมอดูเลตความถี่มีข้อเสียคือไม่มีการวัดเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณซึ่งสามารถนำไปแปลงเป็นระยะได้ แต่หากใช้วิธีการมอดูเลตความถี่ของสัญญาณที่ส่ง สัญญาณจะมีการเพิ่มหรือลดความถี่เป็นระยะ ๆ เมื่อมีสัญญาณสะท้อนกลับมาถึงสายอากาศฝั่งรับ การเปลี่ยนแปลงความถี่ดังกล่าวจะทำให้เกิดความล่าช้า Δt (โดยการเลื่อนของรันไทม์) เหมือนกับในเทคนิคเรดาร์พัลส์ อย่างไรก็ตามในเรดาร์พัลส์ จะต้องวัดระยะเวลาในการทำงานโดยตรงแต่ในเรดาร์ FMCW จะวัดระยะเวลาการทำงานโดยการวัดความแตกต่างของเฟสหรือความถี่



ระหว่างสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับแทนดังแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ FMCW ส่งและรับ

ลักษณะพื้นฐานของเรดาร์ FMCW คือ

- ความสามารถในการทดสอบระยะเป้าหมายและความเร็วสัมพัทธ์
- ความแม่นยำสูงมากในการทดสอบระยะ
- การประมวลผลสัญญาณหลังจากการผสมสัญญาณจะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำจึงช่วยลดความซับซ้อนในการประมวลผลวงจรการประมวลผล

การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นแบบเชิงเส้นในช่วงกว้างทำให้เรดาร์สามารถกำหนดระยะได้จากการเปรียบเทียบความถี่ ความแตกต่างของความถี่ Δf แปรผันตรงกับระยะทาง R เนื่องจากมีเพียงค่าบวกของความแตกต่างความถี่เท่านั้นที่สามารถทดสอบได้ (ไม่สามารถหาค่าลบของความถี่ได้)

ผลที่ได้คือความถี่ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับความถี่ที่ลดลง (ในสถานการณ์แบบเป้าหมายคงที่จะไม่มีผล Doppler)

2.1 Range Resolution

Range Resolution หรือความละเอียดของช่วงระยะคือพารามิเตอร์เพื่อบอกว่าระบบเรดาร์สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสองเป้าหมายในช่วงระยะหนึ่งได้ดีแค่ไหน Range Resolution จึงเป็นระยะทางต่ำสุดที่เกิดขึ้นจริงระหว่างสองเป้าหมายก่อนที่จะไม่สามารถถูกแยกจากกันได้ในช่วงระยะหนึ่ง Range Resolution ที่ควรเกิดขึ้นถูกกำหนดให้เป็นจุดที่มีค่า -3 dB ต่ำกว่าค่าตอบสนองสูงสุดของเป้าหมาย สำหรับระบบเรดาร์ FM เชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์แบบ chirp ค่า Range Resolution สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\rho_r = \frac{c}{2BW}, \quad (2.1)$$

โดยที่ c คือความเร็วของแสง และ BW คือแบนด์วิดท์ของสัญญาณ FM ที่ส่งไป

การประเมินสำหรับ Range Resolution ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากลำดับขั้นที่สูงกว่าเช่น ความเชิงเส้นของแหล่งที่มาของ FM chirp, การเหลื่อมกันของการส่งและรับสัญญาณพัลส์ และการประมวลผลแบนด์วิดท์ของฝั่งรับ การประเมินนี้ควรเกิดจากแหล่งที่มาที่เป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์, การเหลื่อมที่รับได้ของการส่งและรับพัลส์, และแบนด์วิดท์การประมวลผลฝั่งรับที่เพียงพอสำหรับสัญญาณพัลส์

2.2 Maximum Range

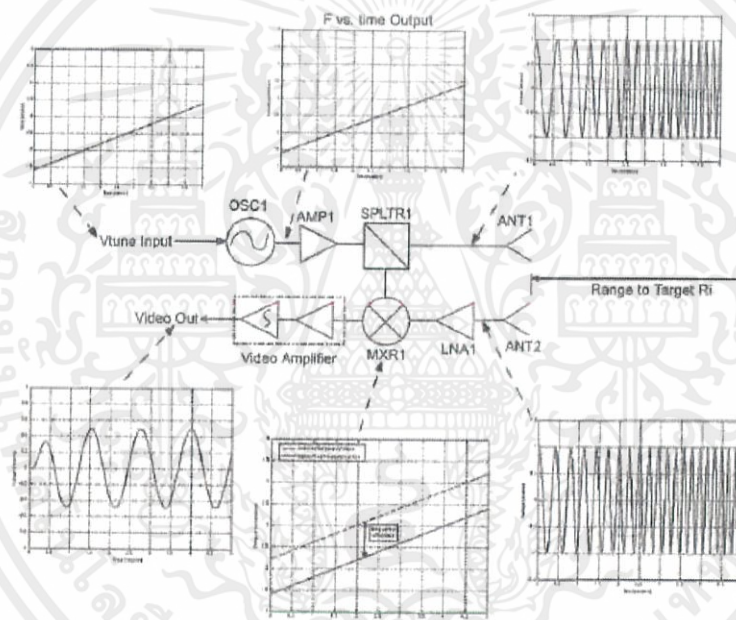
สำหรับระบบเรดาร์ FM ที่มีการเกิดสัญญาณจากวงจรมอดูเลเตอร์เป็นรูปแบบซ้ำๆ อย่างต่อเนื่อง จะสามารถหาระยะทางสูงสุดที่สามารถตรวจจับวัตถุได้จากสมการที่ 2.1

$$R_{\max} = \frac{cT_p}{2}, \quad (2.1)$$

โดยที่ T_p คือคาบเวลาของสัญญาณจากวงจรมอดูเลเตอร์

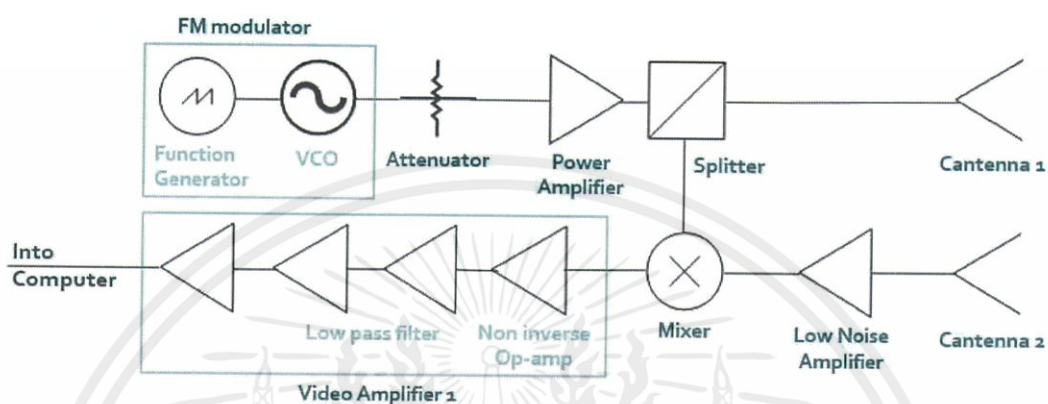
2.3 สถาปัตยกรรมของ FMCW Radar

เรดาร์แบบ FMCW ถือเป็นวิธีแก้ปัญหาสำหรับการออกแบบเรดาร์กำหนดระยะทางใกล้แบบแบนด์กว้างเนื่องจากตัวเรดาร์ไม่ต้องอาศัยการส่งแบบพัลส์เพราะมีการส่งและรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้สามารถตรวจจับระยะทางใกล้ๆของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางฟูรีเยร์ซึ่งช่วยเพิ่มความไวของระบบ เรดาร์สามารถสร้างได้ด้วยอุปกรณ์ราคาไม่แพงและมีสถาปัตยกรรมแบบ Linear Coherent ซึ่งไม่ต่างจากเรดาร์ CW มากนักดังแสดงในรูปที่ 2.2 ต่างกันเพียงการให้สัญญาณอินพุตของเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุมเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อเป็นการมอดูเลตทางความถี่ เรดาร์ชนิดนี้จะให้ข้อมูลแอนะล็อกในโดเมนความถี่ spatial ซึ่งจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อกำหนดระยะจากเรดาร์ถึงวัตถุเป้าหมาย



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมเรดาร์ FMCW แบบ Linear Coherent

บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ FMCW จะแสดงในรูปที่ 2.3 คล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ CW ต่างกันเพียงอินพุตแรงดันไฟฟ้าเข้า (Vtune) ของ VCO หรือเครื่องกำเนิดความถี่แบบใช้แรงดันควบคุมเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณหรือ Function Generator ทำให้ผลลัพธ์ของ VCO เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามเวลาเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ FMCW

Cantenna1 ถือเป็นสายอากาศแบบ Circular Waveguide สร้างจากกระป๋องอลูมิเนียมขนาดเล็ก และมีความสามารถในการกระจายสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ประมาณ 2.26 GHz ถึงประมาณ 2.59 GHz โดยมีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 14.54 dBi และค่า HPBW (Half Power Beam Width) ประมาณ 64 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบ

สัญญาณนี้จะแพร่กระจายผ่านอากาศกระจายออกไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับไปยังเรดาร์ซึ่งส่วนหนึ่งจะรับสัญญาณผ่านเข้ามาจาก Cantenna2 ดังนั้นสัญญาณที่รับได้โดย Cantenna2 จึงเป็นสัญญาณที่ล่าช้าของสัญญาณเดิมที่ส่งไป หลังจากนั้นสัญญาณจาก Cantenna2 จะถูกขยายโดยเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) แล้วจึงป้อนเข้าเข้าไปในพอร์ต RF ของ Mixer โดยในส่วนพอร์ต LO (Local Oscillator) ของเครื่องผสมสัญญาณ (Mixer) จะถูกป้อนสัญญาณจาก Splitter เป็นส่วนของสัญญาณฝั่งส่งที่ถูกแยกมาเก็บไว้ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจาก Mixer จึงเป็นการคูณสองคลื่น FMCW ของฝั่งส่งและฝั่งรับ เนื่องจากคลื่นทั้งสองเป็นสัญญาณ FM ที่มีการเพิ่มและลดความถี่ตามสัญญาณสามเหลี่ยมจาก Function Generator ความถี่ของสัญญาณจึงเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นที่สอดคล้องกัน ทำให้ระบบเรดาร์นี้เป็นแบบ Linear Coherent

พิจารณาการเปลี่ยนความถี่ต่อหน่วยเวลาของสัญญาณส่งกับสัญญาณที่รับได้เมื่อพล็อตเทียบกันในแกนเวลาจะพบว่ามีการค่าความถี่ offset คงที่ระหว่างทั้งสองสัญญาณ offset ความถี่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างคงที่นี้จะแปรผันตรงกับระยะของเป้าหมายและยังค่าความถี่ offset นี้เพิ่มขึ้น ระยะไปถึงเป้าหมายก็เพิ่มขึ้นด้วย

หลังจากสัญญาณคูณกันภายใน Mixer แล้วจะได้เอาต์พุต (ซึ่งผ่านการขยาย และ Low-Pass Filtered โดยวงจร Video Amplifier) เป็นความถี่ beat (Beat Frequency f_b) ซึ่งหากมีหลายเป้าหมายก็จะมีหลายความถี่ beat ทำให้มีการซ้อนทับกันของสัญญาณในเอาต์พุตจากวงจร Video Amplifier แต่ละค่าความถี่ offset ในสัญญาณเอาต์พุตนี้จะแสดงถึงค่าระยะ เฟส และขนาดสัญญาณที่กระจัดกระจาย จึงต้องใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ในการหาระยะถึงเป้าหมายโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณ

อีกหนึ่งวิธีในการพิจารณาระยะถึงเป้าหมายในเทอมของความถี่ beat คือการมองว่าแต่ละค่าความถี่คือความถี่ spatial ซึ่งหมายความว่ายิ่งเป้าหมายอยู่ไกลออกไปมากเท่าไร ค่าความถี่ spatial ก็จะมากขึ้นเท่านั้น

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

- | | | |
|--|---|---------|
| 1. สายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ทำจากกระป๋อง | 2 | ตัว |
| 2. วงจรภาค Baseband | | |
| 3. วงจรภาค RF Radar | | |
| 4. Spectrum analyzer | 1 | เครื่อง |
| 5. Network analyzer | 1 | เครื่อง |
| 6. Function generator | 1 | เครื่อง |
| 7. Power supply | 1 | เครื่อง |
| 8. Oscilloscope | 1 | เครื่อง |
| 9. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Microwave Chamber) | | |



(ก) Spectrum analyzer



(ข) Network analyzer



(ค) Function generator



(ง) Power supply



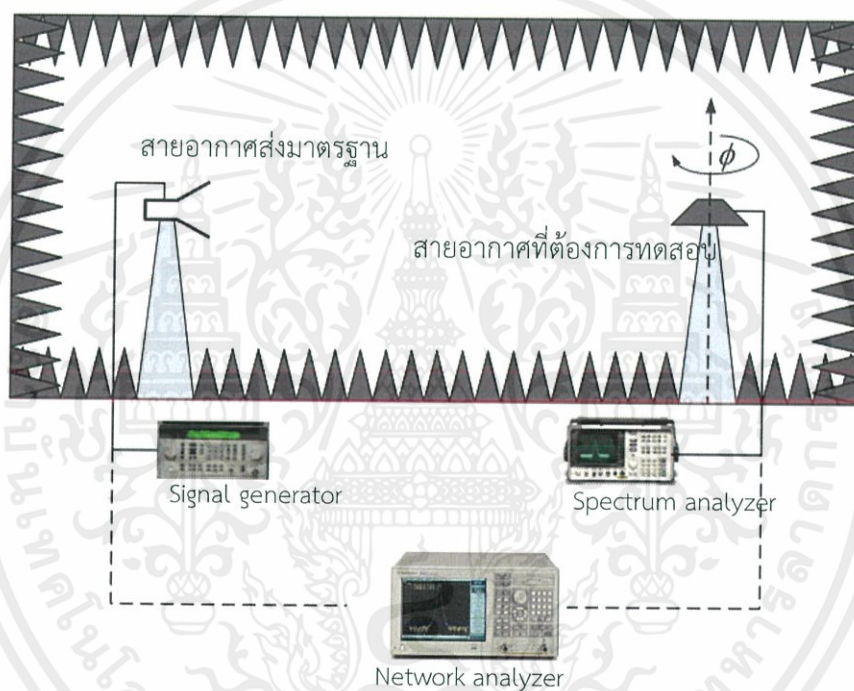
(จ) Oscilloscope

รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Chamber)



รูปที่ 3 การทดสอบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดสอบวงจร

ตอนที่ 1.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ Oscilloscope (รูปที่ 1 - จ)
2. ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมออกจากขา 2 ของ XR - 2206 (CH1) และวัดสัญญาณพัลส์ออกจากขา 11 ของ XR - 2206 (CH2)
3. สังเกตและวาดกราฟ



CH1 : Volt/div = CH1 : Time/div =

CH2 : Volt/div = CH2 : Time/div =

รูปที่ 4 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ตอนที่ 2.2 การทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low - Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen-Key

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดอัตราขยายและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้ Oscilloscope (รูปที่ 1 - จ)
2. ทำการวัดอัตราขยายได้ที่ขา 8 ของ LM - 324 และ ทำการวัดวงจรความถี่ต่ำผ่านได้ที่ขา 1 ของ LM - 324
3. สังเกตและบันทึกค่า Amplitude ของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆที่สังเกตได้ลงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low-Pass Butterworth Filter)
โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen - Key

f (KHz)	2	4	6	8	10	12	14	15	16	17	20	50	100
V (Vpp)													

จากตารางที่ 1 จะได้ว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน cut off อยู่ที่ Hz

ตอนที่ 2 การทดสอบสายอากาศ

ตอนที่ 2.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

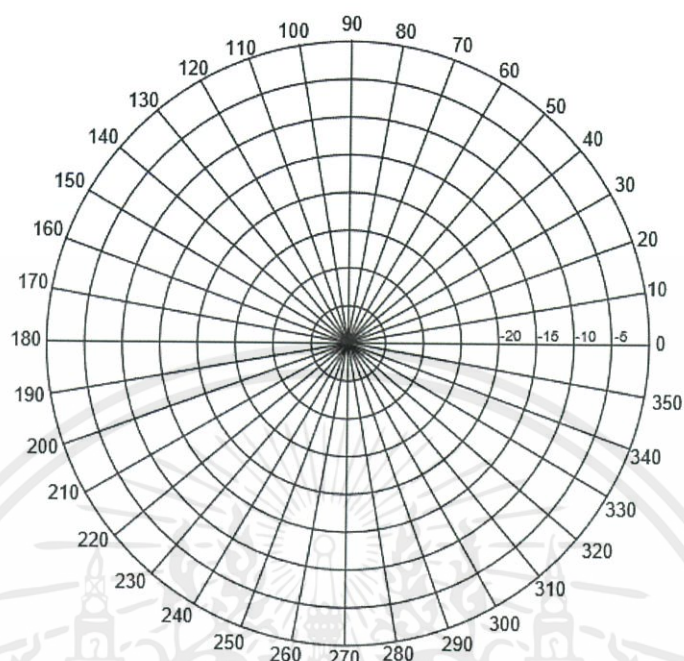
ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้สายอากาศ 2 ตัวมาทดสอบ โดยการติดตั้งเพื่อทำการทดสอบสายอากาศที่ต้องการทราบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะเชื่อมต่อกับ port 2
2. สายอากาศส่งจะใช้สายอากาศคู่เหมือน จะเชื่อมต่อกับ port 1 ของเครื่อง Network Analyzer
3. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ที่ทดสอบที่ 2.4 GHz
4. บันทึกค่า Amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกอย่างของการหมุนมุม ϕ ของสายอากาศรับ ทั้งระนาบ XZ และระนาบ YZ แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 2
5. วาดกราฟบน Polar Graph ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

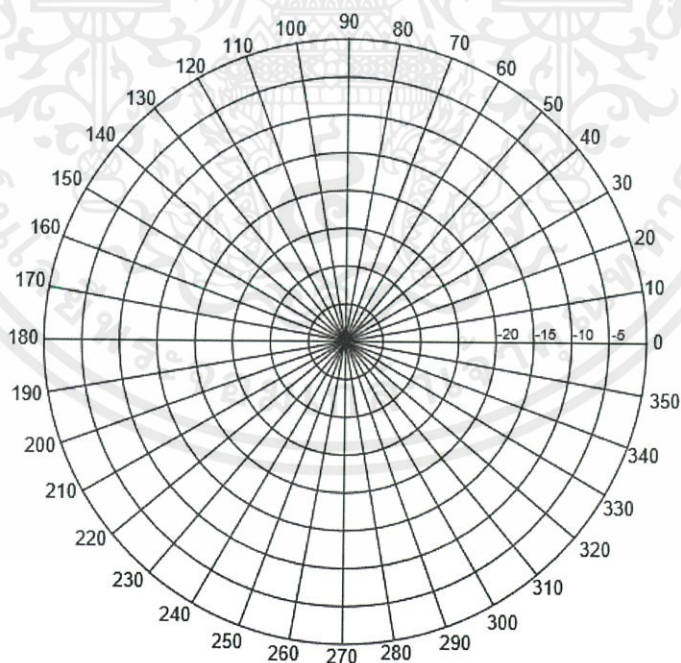
ตารางที่ 2 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

Angle ϕ (°)	Value		Angle ϕ (°)	Value		Angle ϕ (°)	Value	
	plane XZ	plane YZ		plane XZ	plane YZ		plane XZ	plane YZ
0			130			250		
10			140			260		
20			150			270		
30			160			280		
40			170			290		
50			180			300		
60			190			310		
70			200			320		
80			210			330		
90			220			340		
100			230			350		
110			240			360		
120								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม φ) ในระนาบ XZ
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)



รูปที่ 6 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม φ) ในระนาบ YZ
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)

ตอนที่ 2.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna gain)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3
2. ทำการ calibrate สาย coaxial 2 เส้นที่ต่อกับสายอากาศกับเครื่อง Network Analyzer ที่ port 1 และ port 2 ตามลำดับ
3. นำสาย coaxial ไปเชื่อมกับหัว SMA ของสายอากาศทั้งสองตัว โดยให้สายอากาศที่ต่อกับ port 1 เป็นสายอากาศฝั่งส่ง ละสายอากาศที่ต่อกับ port 2 เป็นสายอากาศฝั่งรับ
4. ตั้งสายอากาศทั้งสองในห้องไร้การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความสูงระดับเท่าๆกัน และให้ห่างกันระยะ 1 m ถือเป็นระยะ R
5. กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่า Power Coupling (2 - 3 GHz) ก่อนทำการวัดค่าแล้วบันทึกผล

ที่ความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) มีค่า

ตอนที่ 2.3 การทดสอบ Return Loss

ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3
2. ต่อปลายสาย coaxial อีกฝั่งเข้ากับ port 1 ของเครื่อง Network Analyzer แล้วกำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่า Return Loss (2 - 3 GHz)
3. ตัดลวดโมโนโพลจนได้ค่า Return Loss หรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการ (2.26 - 2.59 GHz)
4. สังเกตและบันทึกค่า Reflection Coefficient (dB) ตามตารางที่ 3 และตารางที่ 4
5. วาดบนกราฟในรูปที่ 7 และรูปที่ 8

ตารางที่ 3 บันทึกผลการทดสอบ Return Loss ฝั่งรับ

f (KHz)	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
dB											

ตารางที่ 4 บันทึกผลการทดสอบ Return Loss ฝั่งส่ง

f (KHz)	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
dB											



รูปที่ 7 การทดสอบ Return Loss ฝั่งรับ



รูปที่ 8 การทดสอบ Return Loss ฝั่งส่ง

ตอนที่ 3 การทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบความเร็ว

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก สวิตช์โหมด CW สำหรับการตรวจวัดความเร็ว
2. เชื่อมต่อ audio input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย audio
3. บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมายที่เคลื่อนที่ (กำหนดให้คนวิ่งผ่านเรดาร์ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยระบบซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
5. อ่านค่าความเร็วที่สามารถสังเกตได้จากสเปกโตรแกรมและบันทึกในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 บันทึกผลการทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบความเร็ว

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
ความเร็วที่อ่านได้ (m/s)						

ตอนที่ 4 การทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบระยะทาง

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก สวิตช์โหมด FMCW สำหรับการตรวจวัดระยะทาง
2. เชื่อมต่อ audio input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย audio
3. บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมายที่เคลื่อนที่ (กำหนดให้คนวิ่งเข้าหาเรดาร์ตามระยะทางที่กำหนดให้)
4. นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยระบบซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
5. อ่านค่าระยะทางที่สามารถสังเกตได้จากสเปกโตรแกรม และบันทึกในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 บันทึกผลการทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบระยะทาง

ระยะที่กำหนดให้ (m)	3	5	7	10	15	20
ระยะที่อ่านได้ (m)				12		

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dr. Gregory L. Charvat. "Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imaging." <http://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/#>.
- [3] Gregory L. Charvat. "MIT IAP 2011 Laptop Based Radar:Block Diagram, Schematic s,Bill of Material,and Fabrication Instructions." https://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/projects/MITRES_LL_003IAP11_proj_in.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] JH Williams. “Modular System RF Design.” https://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/lecture-notes/MITRES_LL_003IAP11_lec03.pdf.
- [7] “Coffee-Can Radar.” <https://www.slideshare.net/yousseframzy/coffee-can-radar>.
- [11] “เรดาร์.” <https://th.wikipedia.org/wiki/เรดาร์>.
- [12] Christian Wolff. “Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar.” www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

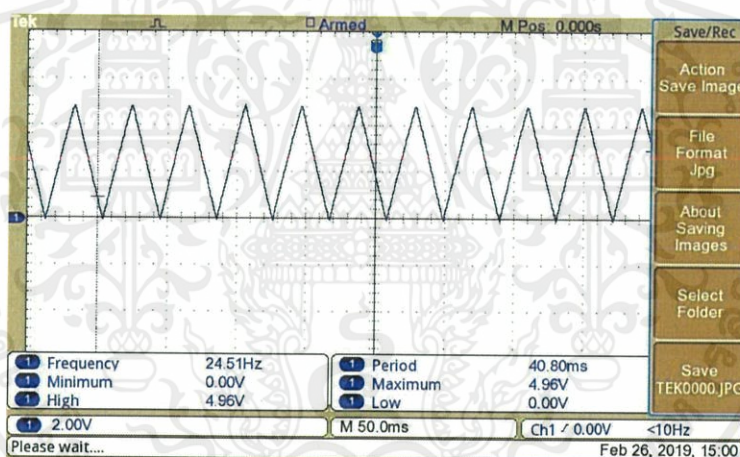
เฉลย

การทดลองเรดาร์กระป๋องขนาดเล็กกับการตรวจจับความเร็วและระยะทางระยะใกล้
ลำดับขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดสอบวงจร

ตอนที่ 1.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

1. ขั้นตอนการทดลอง
2. ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ Oscilloscope (รูปที่ 1 - จ)
3. ทำการวัดสัญญาณสามเหลี่ยมออกจากขา 2 ของ XR - 2206 (CH1) และวัดสัญญาณพัลส์ออกจากขา 11 ของ XR - 2206 (CH2)
4. สังเกตและวาดกราฟ



รูปที่ 4 การทดสอบวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ตอนที่ 2.2 การทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low - Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen - Key

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดอัตราขยายและวงจรถ่ายความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้ Oscilloscope (รูปที่ 1 - จ)
2. ทำการวัดอัตราการขยายได้ที่ขา 8 ของ LM - 324 และ ทำการวัดวงจรถ่ายความถี่ต่ำผ่านได้ที่ขา 1 ของ LM - 324

3. สังเกตและบันทึกค่า Amplitude ของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆที่สังเกตได้ลงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low - Pass Butterworth Filter) โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบ Sallen - Key

f (KHz)	2	4	6	8	10	12	14	15	16	17	20	50	100
V (Vpp)													

จากตารางที่ 1 จะได้ว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน cut off อยู่ที่ 16 Hz

ตอนที่ 2 การทดสอบสายอากาศ

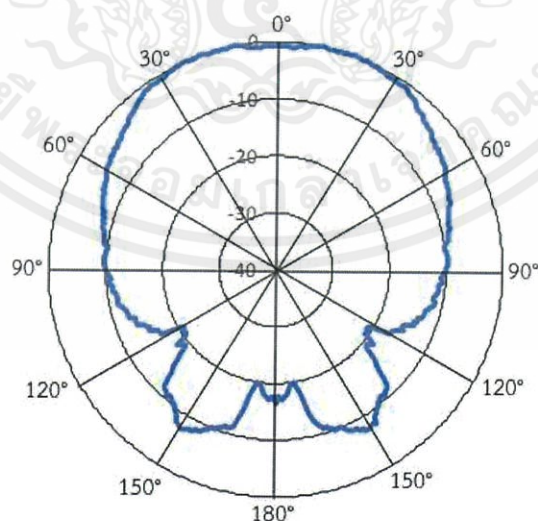
ตอนที่ 2.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้สายอากาศ 2 ตัวมาทดสอบ โดยการติดตั้งเพื่อทำการทดสอบสายอากาศที่ต้องการทราบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะเชื่อมต่อกับ port 2
2. สายอากาศส่งจะใช้สายอากาศคู่เหมือน จะเชื่อมต่อกับ port 1 ของเครื่อง Network Analyzer
3. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ที่ทดสอบที่ 2.4 GHz
4. บันทึกค่า Amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกอย่างองศาของการหมุนมุม ϕ ของสายอากาศรับ ทั้งระนาบ XZ และระนาบ YZ แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 2
5. วาดกราฟบน Polar Graph ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

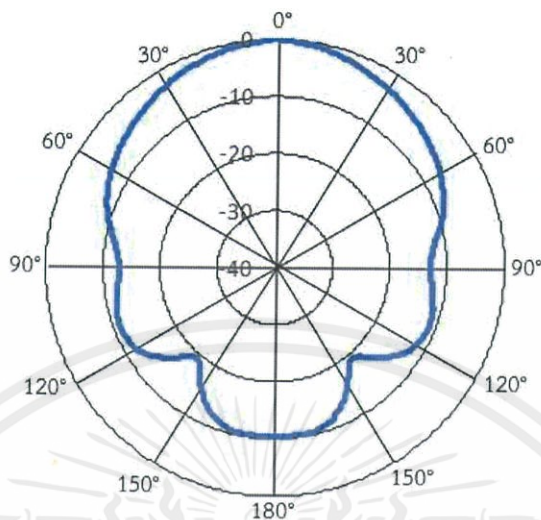
ตารางที่ 2 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)
(สามารถอ่านค่าได้จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แล้วนำมาบันทึกลงในตาราง)

Angle ϕ (°)	Value		Angle ϕ (°)	Value		Angle ϕ (°)	Value	
	plane XZ	plane YZ		plane XZ	plane YZ		plane XZ	plane YZ
0	0	0	130	-27.29	-11.91	250	-17.43	-14.49
10	-0.31	-0.19	140	-25.66	-11.84	260	-14.53	-13.52
20	-1.15	-0.93	150	-20.90	-14.18	270	-13.06	-10.74
30	-2.45	-2.14	160	-18.73	-17.87	280	-12.16	-8.86
40	-4.18	-3.53	170	-15.34	-20.13	290	-10.38	-7.49
50	-6.34	-5.00	180	-14.54	-19.31	300	-8.30	-6.29
60	-8.30	-6.29	190	-15.34	-20.13	310	-6.34	-5.00
70	-10.38	-7.49	200	-18.73	-17.87	320	-4.18	-3.53
80	-12.16	-8.86	210	-20.90	-14.18	330	-2.45	-2.14
90	-13.06	-10.74	220	-25.66	-11.84	340	-1.15	-0.93
100	-14.53	-13.52	230	-27.29	-11.91	350	-0.31	-0.19
110	-17.43	-14.49	240	-23.44	-13.31	360	0	0
120	-23.44	-13.31						



รูปที่ 5 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ϕ) ในระนาบ XZ
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) 89.11°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

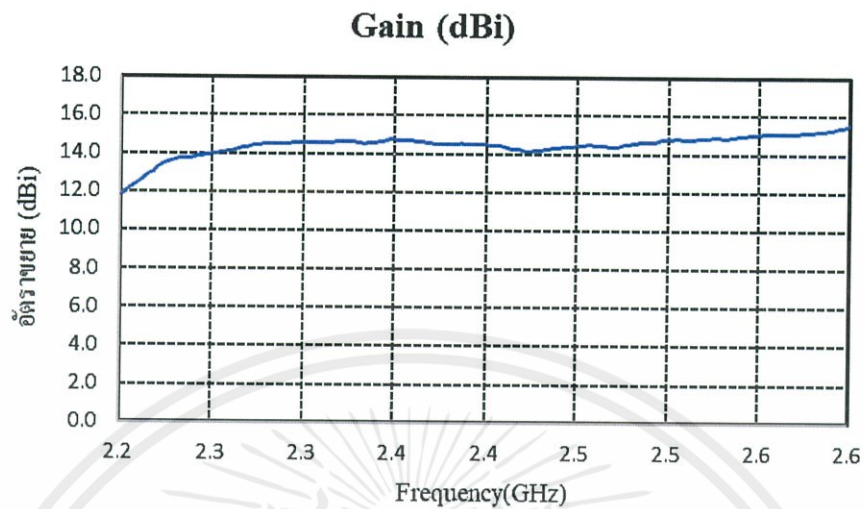


รูปที่ 6 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ϕ) ในระนาบ YZ
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) 69.51°

ตอนที่ 2.2 การทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna gain)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3
2. ทำการ calibrate สาย coaxial 2 เส้นที่ต่อกับสายอากาศกับเครื่อง Network Analyzer ที่ port 1 และ port 2 ตามลำดับ
3. นำสาย coaxial ไปเชื่อมกับหัว SMA ของสายอากาศทั้งสองตัว โดยให้สายอากาศที่ต่อกับ port 1 เป็นสายอากาศฝั่งส่ง ละสายอากาศที่ต่อกับ port 2 เป็นสายอากาศฝั่งรับ
4. ตั้งสายอากาศทั้งสองในห้องไร้การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความสูงระดับเท่าๆกัน และให้ห่างกันระยะ 1 m ถือเป็นระยะ R
5. กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่า Power Coupling (2 - 3 GHz) ก่อนทำการวัดค่าแล้วบันทึกผล



(รูปที่สามารถสังเกตได้จากเครื่อง Network Analyzer)

ที่ความถี่ 2.4 GHz มีอัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) มีค่า **14.53 dBi**

ตอนที่ 2.3 การทดสอบ Return Loss

ขั้นตอนการทดลอง

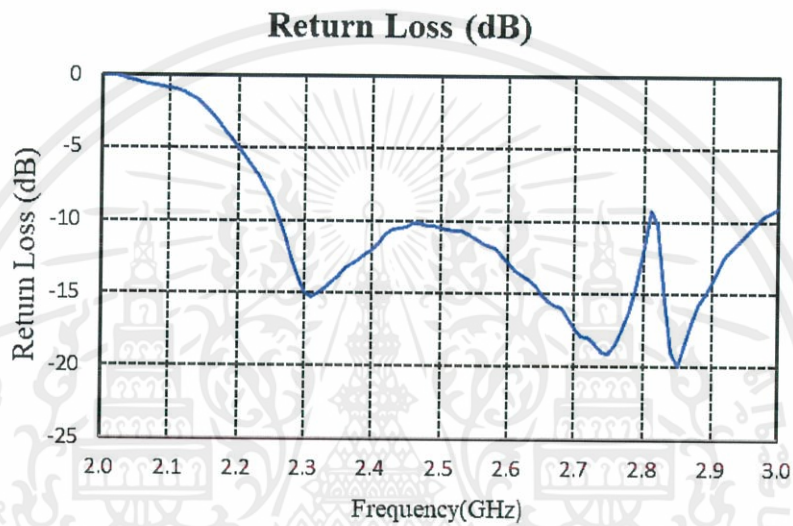
1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3
2. ต่อปลายสาย coaxial อีกฝั่งเข้ากับ port 1 ของเครื่อง Network Analyzer แล้วกำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการวัดค่า Return Loss (2 - 3 GHz)
3. ตัดลวดโมโนโพลจนได้ค่า Return Loss หรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการ (2.26 - 2.59 GHz)
4. สังเกตและบันทึกค่า Reflection Coefficient (dB) ตามตารางที่ 3 และตารางที่ 4
5. วาดบนกราฟในรูปที่ 7 และรูปที่ 8

ตารางที่ 3 บันทึกผลการทดสอบ Return Loss ฝั่งรับ

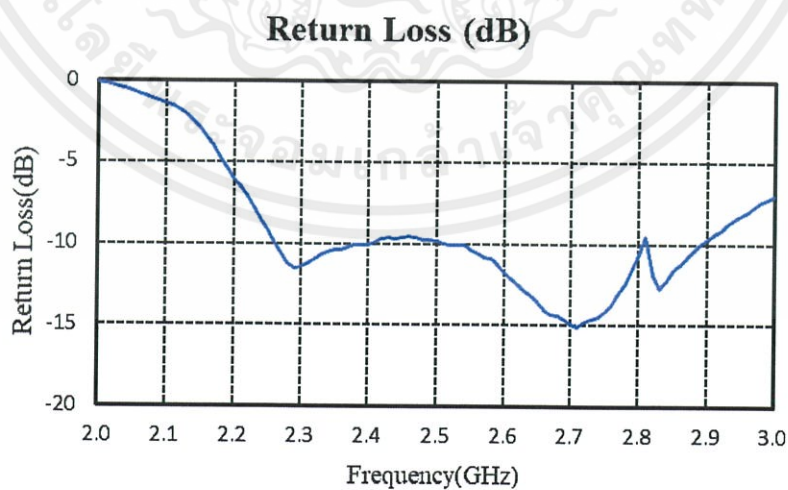
f (KHz)	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
dB	0	-1.8	-5	-14.9	-12.2	-10.3	-13	-17.6	-11.9	-14.1	-9.1

ตารางที่ 4 บันทึกผลการทดสอบ Return Loss ฝั่งส่ง

f (KHz)	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
dB	0	-2.3	-6.1	-11.2	-10	-10.1	-12.3	-14.8	-10.3	-9.8	-7.3



รูปที่ 7 การทดสอบ Return Loss ฝั่งรับ



รูปที่ 8 การทดสอบ Return Loss ฝั่งส่ง

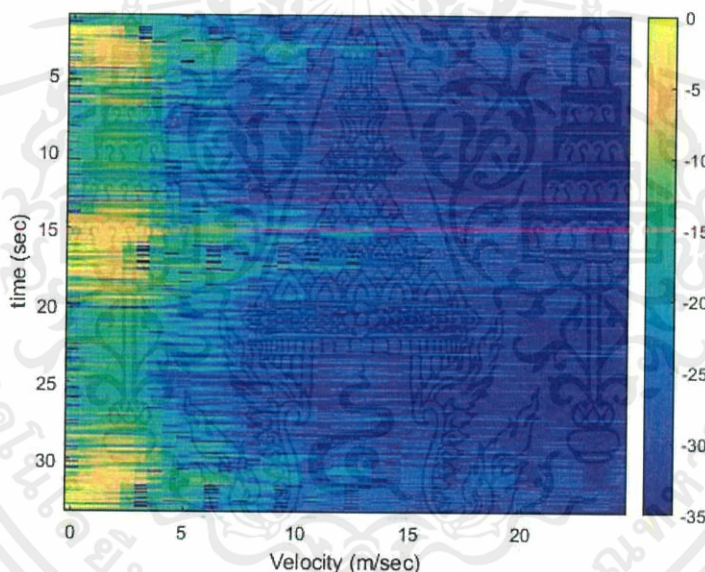
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบความเร็ว

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก สวิตช์โหมด CW สำหรับการตรวจวัดความเร็ว
2. เชื่อมต่อ audio input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย audio
3. บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมายที่เคลื่อนที่ (กำหนดให้เครื่องบินผ่านเรดาร์ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง)
4. นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยระบบซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
5. อ่านค่าความเร็วที่สามารถสังเกตได้จากสเปกโตรแกรม และบันทึกในตารางที่ 5

ทำการทดลองจำนวน 6 ครั้ง (ยกตัวอย่างเฉพาะครั้งที่ 1)



จากสเปกโตรแกรมสามารถอ่านค่าความเร็วได้ประมาณ 8 m

ตารางที่ 5 บันทึกผลการทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบความเร็ว

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
ความเร็วที่อ่านได้ (m/s)	8					

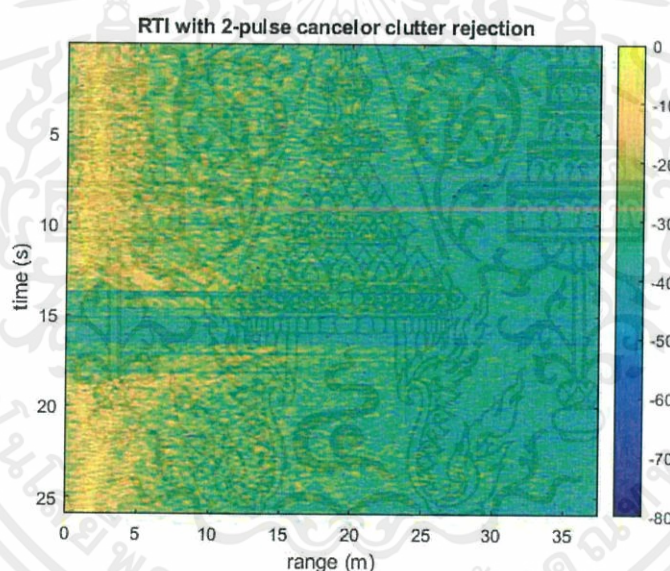
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 การทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบระยะทาง

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก สวิตช์โหมด FMCW สำหรับการตรวจวัดระยะทาง
2. เชื่อมต่อ audio input กับคอมพิวเตอร์ ด้วยสาย audio
3. บันทึกไฟล์ .wav จากระบบเรดาร์ด้วยโปรแกรม audacity โดยทำการตรวจจับจากเป้าหมายที่เคลื่อนที่ (กำหนดให้คนวิ่งเข้าหาเรดาร์ตามระยะทางที่กำหนดให้)
4. นำไฟล์ที่ได้ไปประมวลผลด้วยระบบซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
5. อ่านค่าระยะทางที่สามารถสังเกตได้จากสเปกโตรแกรม และบันทึกในตารางที่ 6

ทำการทดลองตามระยะที่กำหนดให้ (ยกตัวอย่างเฉพาะที่ระยะ 10 m)



จากสเปกโตรแกรมสามารถอ่านค่าระยะทางได้ประมาณ 12 m

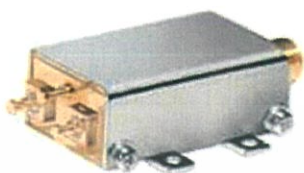
ตารางที่ 6 บันทึกผลการทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบระยะทาง

ระยะที่กำหนดให้ (m)	3	5	7	10	15	20
ระยะที่อ่านได้ (m)				12		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage Controlled Oscillator
(ZX95-2536C+)



CASE STYLE: GB956

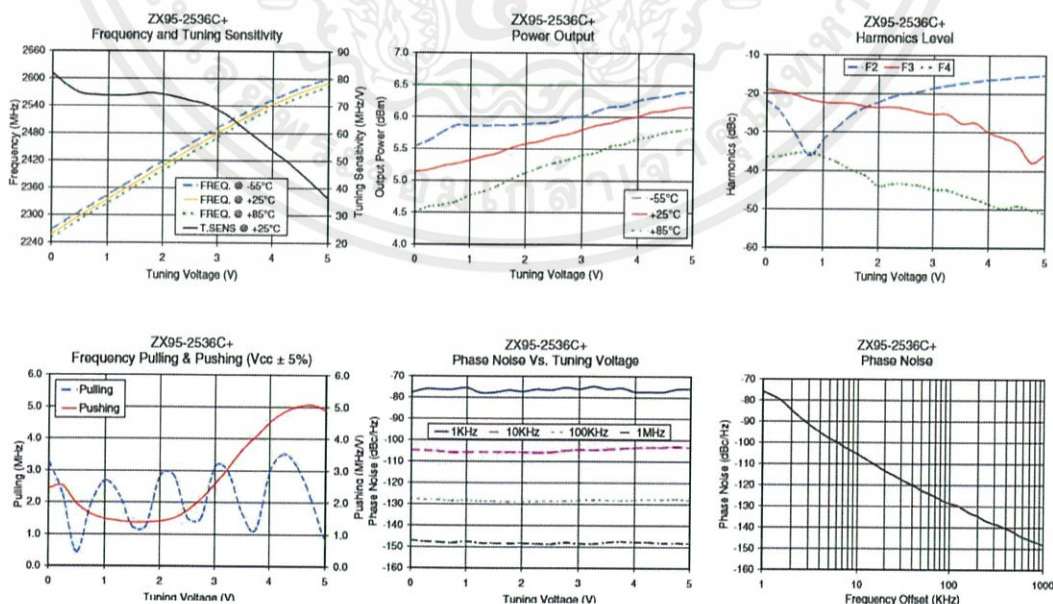
Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Absolute Max. Supply Voltage (Vcc)	5.6V
Absolute Max. Tuning Voltage (Vtune)	7.0V
All specifications	50 ohm system

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

V TUNE	TUNE SENS (MHz/V)	FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)			Icc (mA)	HARMONICS (dBc)			FREQ. PUSH (MHz/V)	FREQ. PULL (MHz)	PHASE NOISE (dBc/Hz) at offsets				FREQ OFFSET (KHz)	PHASE NOISE at 2432 MHz (dBc/Hz)
		-55°C	+25°C	+85°C	-55°C	+25°C	+85°C		F2	F3	F4			1kHz	10kHz	100kHz	1MHz		
0.00	81.90	2267.6	2257.4	2249.2	5.54	5.14	4.51	36.63	-21.7	-19.0	-36.6	2.44	3.28	-77.7	-104.8	-127.5	-147.0	1.0	-75.73
0.50	74.61	2306.7	2297.3	2289.5	5.76	5.23	4.62	37.11	-30.5	-20.4	-35.5	1.96	0.44	-78.2	-105.1	-128.0	-147.9	2.0	-84.74
0.75	73.96	2325.2	2315.9	2308.2	5.87	5.27	4.67	37.29	-38.1	-21.6	-35.4	1.65	1.90	-78.2	-105.7	-128.6	-148.2	3.5	-93.54
1.00	73.78	2344.0	2334.4	2326.4	5.86	5.32	4.77	37.45	-32.0	-22.3	-36.4	1.49	2.67	-75.5	-105.6	-128.2	-147.6	8.0	-99.82
1.25	73.75	2362.7	2352.9	2344.6	5.86	5.38	4.83	37.57	-28.6	-22.4	-37.9	1.42	2.27	-77.8	-105.5	-128.7	-148.3	8.5	-103.77
1.50	74.01	2381.6	2371.3	2362.6	5.87	5.43	4.92	37.67	-25.6	-22.5	-39.9	1.37	1.25	-77.6	-105.5	-128.7	-148.4	10.0	-105.41
1.75	74.71	2400.7	2389.8	2380.6	5.87	5.52	5.03	37.73	-23.5	-23.3	-41.2	1.38	1.27	-76.5	-105.6	-128.9	-148.5	20.8	-113.60
2.00	74.15	2419.7	2408.5	2398.9	5.89	5.58	5.12	37.80	-22.2	-23.5	-44.0	1.41	2.83	-77.1	-105.6	-128.9	-148.4	35.5	-118.96
2.25	73.21	2438.5	2427.0	2417.2	5.90	5.62	5.21	37.87	-20.8	-23.5	-43.4	1.51	2.86	-76.1	-105.9	-128.8	-148.6	60.7	-124.10
2.50	71.91	2456.9	2445.3	2435.4	5.92	5.69	5.28	37.92	-20.0	-23.9	-43.5	1.75	1.53	-76.5	-105.6	-128.7	-148.8	85.2	-127.31
2.75	70.82	2475.0	2463.3	2453.3	6.00	5.73	5.33	37.95	-19.5	-24.7	-43.9	2.12	1.51	-75.3	-104.9	-128.6	-148.1	100.0	-128.68
3.00	68.45	2492.6	2481.0	2471.1	6.01	5.80	5.40	37.97	-18.5	-25.3	-44.9	2.58	3.12	-76.0	-104.4	-128.3	-148.6	142.9	-131.46
3.25	65.44	2509.4	2498.5	2488.3	6.09	5.87	5.44	37.99	-17.9	-25.3	-45.0	3.09	2.95	-74.7	-104.6	-128.1	-148.7	167.8	-133.29
3.50	61.36	2525.2	2514.5	2504.9	6.16	5.91	5.54	38.02	-17.3	-27.7	-46.3	3.65	1.69	-76.0	-104.2	-128.2	-148.0	200.6	-134.52
3.75	57.60	2540.3	2529.8	2520.7	6.18	5.97	5.58	38.06	-16.8	-27.5	-47.3	4.08	1.15	-75.5	-103.9	-128.4	-147.5	281.6	-137.84
4.00	53.58	2554.4	2544.2	2535.4	6.26	6.01	5.66	38.06	-16.3	-30.1	-48.7	4.52	2.96	-77.2	-103.4	-128.0	-147.9	330.7	-138.85
4.25	50.01	2567.6	2557.6	2549.0	6.30	6.08	5.70	38.06	-16.1	-31.4	-49.8	4.84	3.53	-77.3	-103.2	-127.7	-147.8	464.2	-141.63
4.50	45.62	2579.9	2570.1	2561.7	6.33	6.10	5.76	38.05	-15.6	-33.0	-49.1	5.01	3.11	-77.3	-103.3	-127.8	-148.3	554.9	-143.78
4.75	41.10	2591.0	2581.5	2573.3	6.38	6.15	5.79	38.05	-15.5	-37.8	-50.1	5.07	2.11	-76.0	-103.0	-127.6	-148.2	914.6	-147.64
5.00	36.26	2601.0	2591.8	2583.8	6.40	6.17	5.83	38.06	-15.2	-35.9	-51.1	4.89	0.87	-75.8	-103.4	-128.1	-148.4	1000.0	-148.33

*at 25°C unless mentioned otherwise



SMA Fixed Attenuator
(VAT-3+)



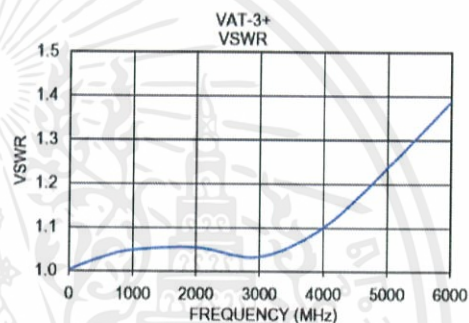
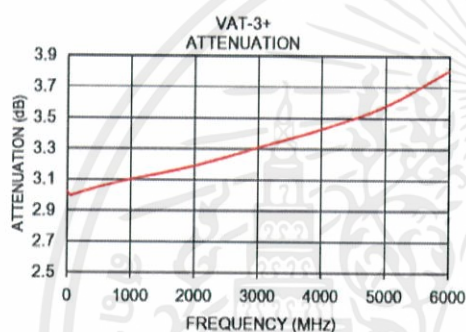
CASE STYLE: FF704

Maximum Ratings

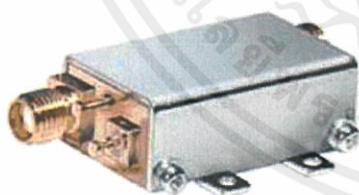
Operating Temperature -45°C to 100°C

Storage Temperature -55°C to 100°C

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



Low Noise Amplifier Coaxial
(ZX60-272LN+)



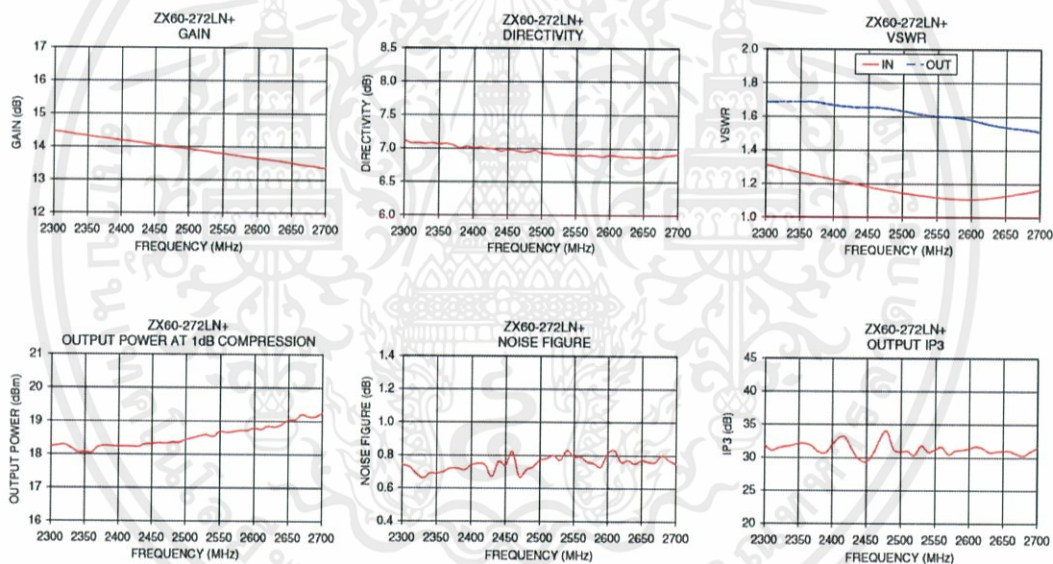
Case Style:GA955

Maximum Ratings

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-40°C to 85°C Case
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	5.5 V
Input RF Power (no damage)	+17 dBm
Power Consumption	400 mW

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)	DIRECTIVITY (dB)	VSWR IN (:1)	VSWR OUT (:1)	POWER OUT @ 1dB COMPRESSION (dBm)	OUTPUT IP3 (dBm)	NF (dB)
2300.00	14.47	7.12	1.31	1.69	18.24	31.83	0.74
2320.00	14.41	7.08	1.29	1.69	18.29	31.42	0.69
2340.00	14.35	7.08	1.27	1.69	18.06	31.78	0.69
2360.00	14.30	7.07	1.26	1.69	18.05	32.10	0.70
2380.00	14.25	7.01	1.24	1.68	18.26	30.83	0.72
2400.00	14.19	7.01	1.23	1.67	18.24	31.89	0.74
2420.00	14.14	7.00	1.21	1.66	18.24	32.98	0.74
2440.00	14.09	6.96	1.19	1.66	18.31	29.71	0.76
2460.00	14.04	6.97	1.17	1.66	18.34	30.51	0.82
2480.00	13.98	6.95	1.16	1.65	18.36	34.00	0.71
2500.00	13.93	6.93	1.15	1.63	18.44	30.84	0.77
2520.00	13.88	6.91	1.13	1.62	18.55	30.31	0.80
2540.00	13.82	6.90	1.12	1.61	18.54	30.79	0.83
2560.00	13.77	6.89	1.11	1.60	18.66	31.57	0.79
2580.00	13.71	6.89	1.11	1.59	18.72	31.01	0.75
2600.00	13.65	6.90	1.11	1.58	18.79	31.36	0.81
2620.00	13.60	6.88	1.11	1.56	18.85	31.41	0.76
2640.00	13.55	6.87	1.12	1.54	18.90	30.90	0.75
2680.00	13.43	6.89	1.15	1.52	19.14	30.29	0.80
2700.00	13.36	6.92	1.17	1.51	19.24	31.47	0.75



Power Splitter
(ZX10-2-42+)

Model	Frequency (MHz)	Isolation (dB)		Ins. Loss (dB) Above 3dB		Phase Unbal. (Degrees)	Ampl. Unbal. (dB)
		Typ.	Min.	Typ.	Max.	Max.	Max.
ZX10-2-12+	2-1200	21	16	0.50	1.5	3.0	0.5
ZX10-2-20+	200-2000	20	16	0.80	2.2	6.0	0.4
ZX10-2-25+	1000-2500	20	14	1.20	2.2	10.0	1.2
ZX10-2-42+	1900-4200	23	10	0.20	1.0	3.0	0.3
ZX10-2-71+	2950-7100	23	10	0.25	0.9	3.0	0.4
ZX10-2-98+	4750-9800	23	10	0.30	1.2	9.0	0.5
ZX10-2-126+	7400-12600	23	10	0.30	1.3	10.0	0.5

Protected under U.S. Patents 6,790,049 & 6,963,255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency Mixer
(ZX05-43MH+)

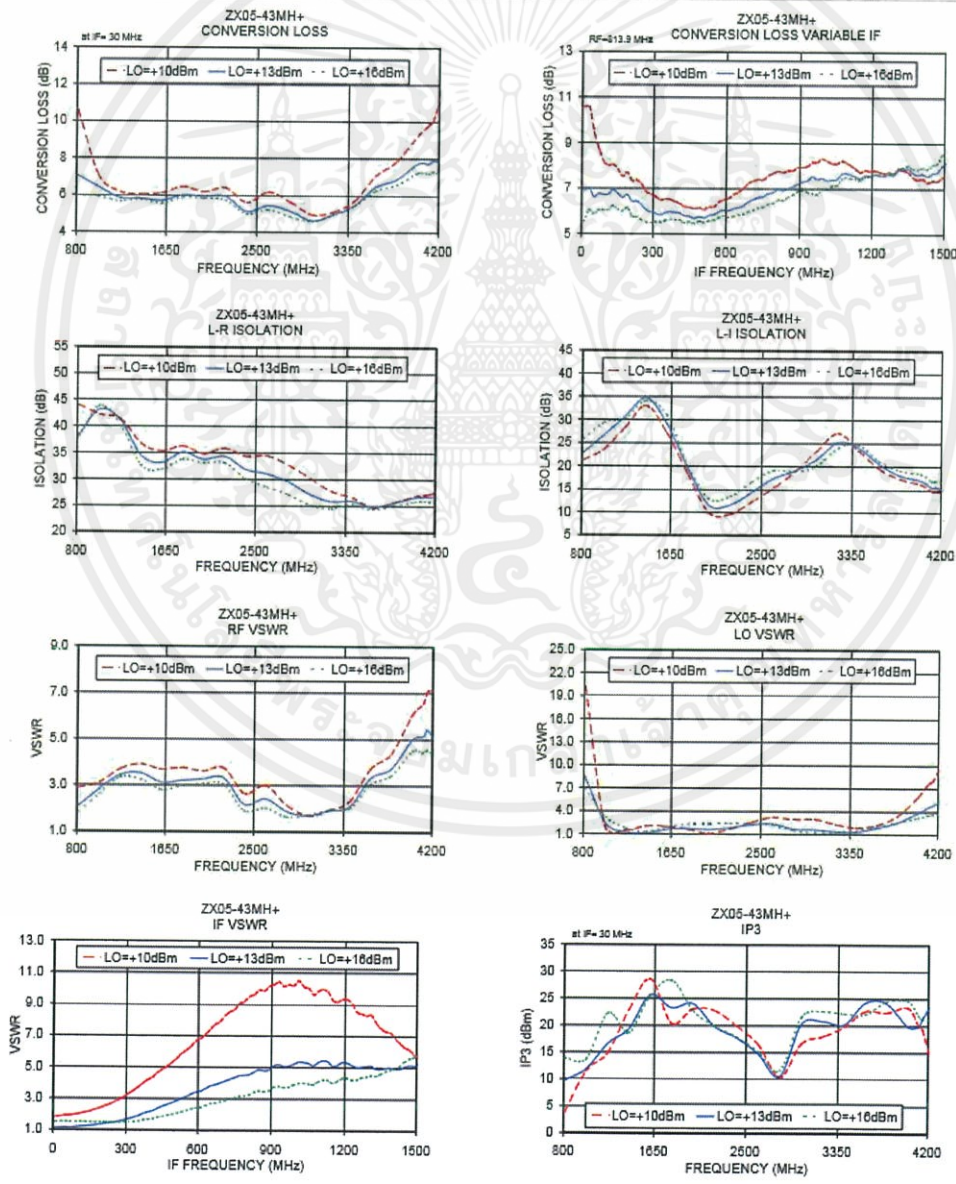


Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Power	50mW

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

CASE STYLE: FL905



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Adapter, SMA-M to SMA-M
(SM-SM50+)



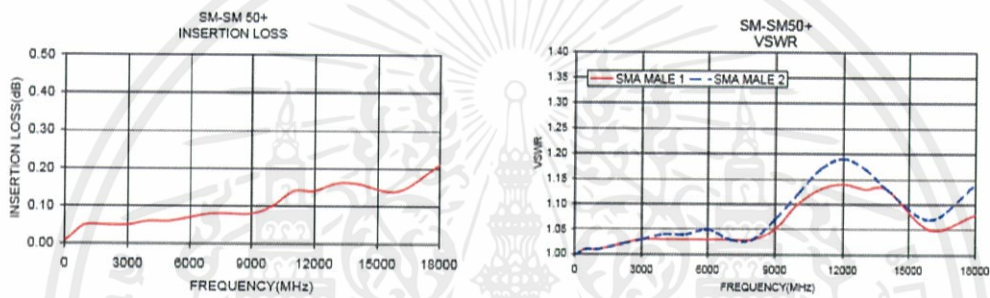
CASE STYLE: DJ951

Maximum Ratings

Operating Temperature -55°C to 100°C

Storage Temperature -55°C to 100°C

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



XR-2206

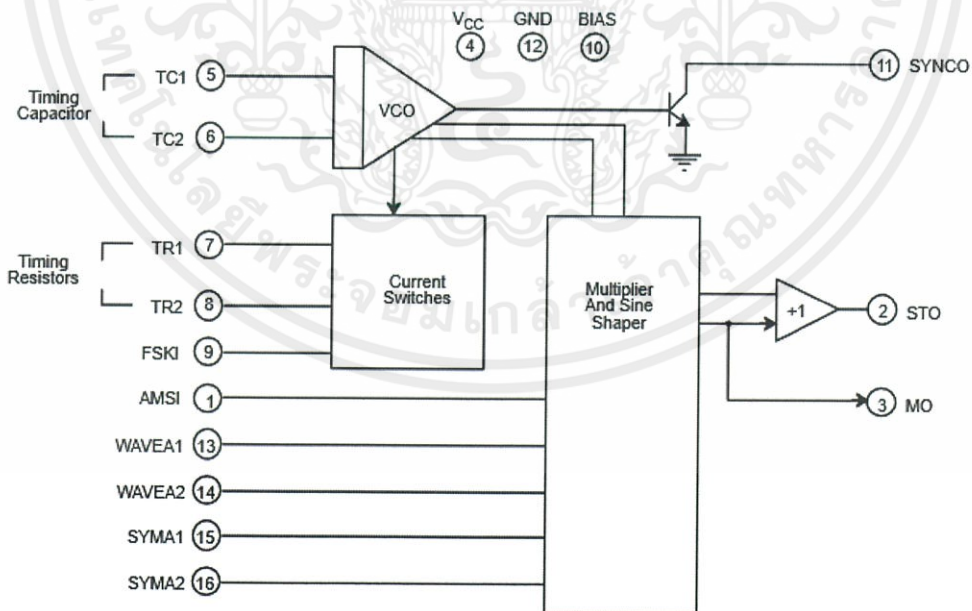
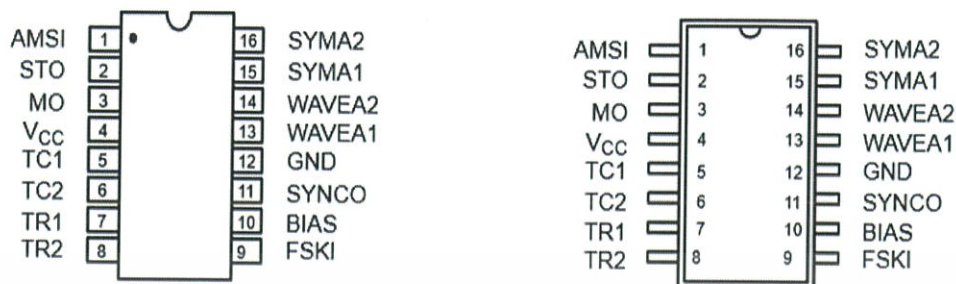


Figure 1. XR-2206 Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



16 Lead PDIP, CDIP (0.300'')

16 Lead SOIC (Jedec, 0.300'')

PIN DESCRIPTION

Pin #	Symbol	Type	Description
1	AMSI	I	Amplitude Modulating Signal Input.
2	STO	O	Sine or Triangle Wave Output.
3	MO	O	Multiplier Output.
4	V _{CC}		Positive Power Supply.
5	TC1	I	Timing Capacitor Input.
6	TC2	I	Timing Capacitor Input.
7	TR1	O	Timing Resistor 1 Output.
8	TR2	O	Timing Resistor 2 Output.
9	FSKI	I	Frequency Shift Keying Input.
10	BIAS	O	Internal Voltage Reference.
11	SYNCO	O	Sync Output. This output is a open collector and needs a pull up resistor to V _{CC} .
12	GND		Ground pin.
13	WAVEA1	I	Wave Form Adjust Input 1.
14	WAVEA2	I	Wave Form Adjust Input 2.
15	SYMA1	I	Wave Symetry Adjust 1.
16	SYMA2	I	Wave Symetry Adjust 2.

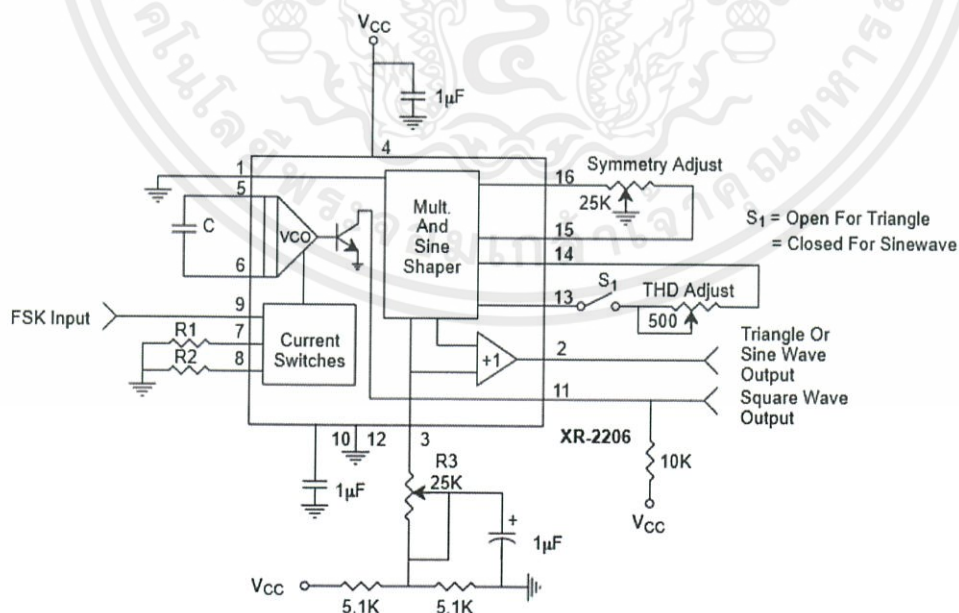


Figure 2. Basic Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Configuration and Functions

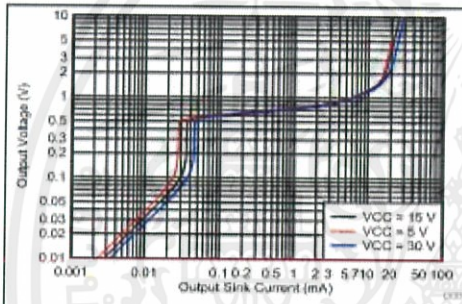
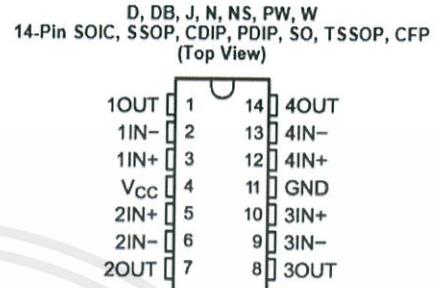
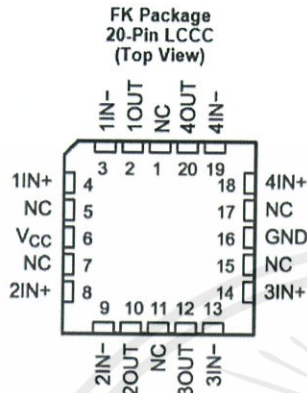


Figure 1. Output Sinking Characteristics

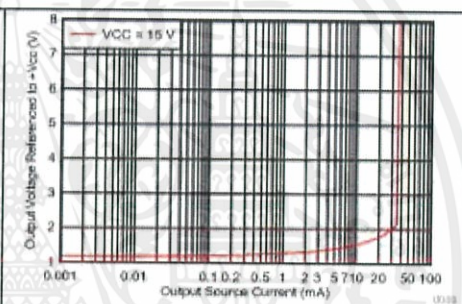


Figure 2. Output Sourcing Characteristics

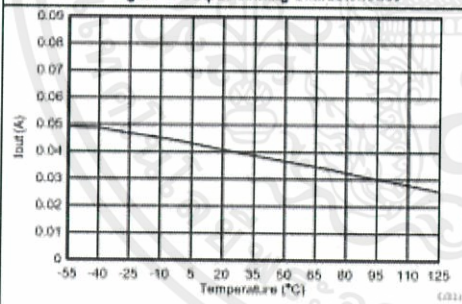


Figure 3. Source Current Limiting

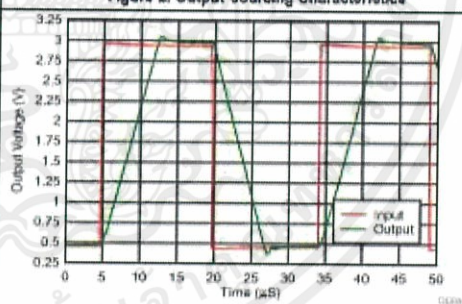


Figure 4. Voltage Follower Large Signal Response (50 pF)

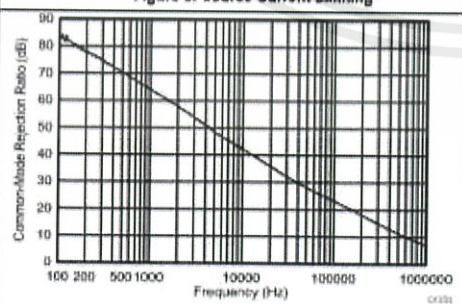


Figure 5. Common-Mode Rejection Ratio

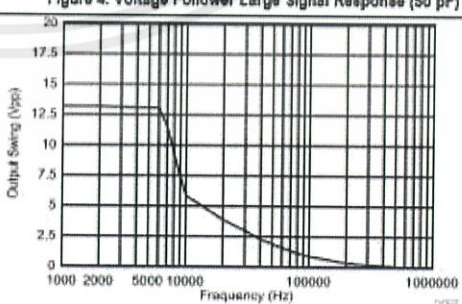


Figure 6. Maximum Output Swing vs. Frequency
(VCC = 15 V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้