

ระบบค้นหาทิศทางคลื่นวิทยุโดยใช้เทคนิควิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์
RADIO DIRECTION FINDING SYSTEM USING SOFTWARE-DEFINED RADIO



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

ระบบค้นหาทิศทางคลื่นวิทยุโดยใช้เทคนิควิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์
RADIO DIRECTION FINDING SYSTEM USING SOFTWARE-DEFINED RADIO

โดย

นายจตุพร ต้วงทอง 54010162

นายจิรภูมิ บุตรโท 54010208



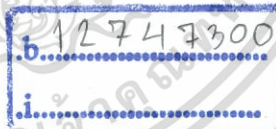
T140857

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

เลขหมู่.....140857

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี..23 ก.พ. 2559



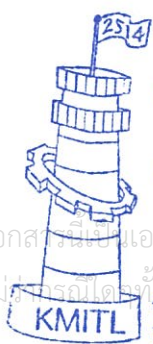
ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

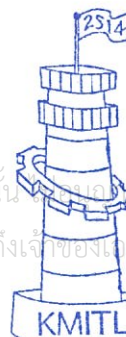
ปีการศึกษา 2557



ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(Signature)
.....
อาจารย์ที่ปรึกษา

11/5/58
วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(Signature)
.....
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

11/5/58
วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้เพื่อการค้า
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ไม่ใช่ระบบ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบค้นหาทิศทางคลื่นวิทยุโดยใช้เทคนิควิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

RADIO DIRECTION FINDING SYSTEM USING SOFTWARE-DEFINED RADIO

ผู้จัดทำ

1. นายจตุพร ด้วงทอง 54010162
2. นายจิรภูมิ บุตรโท 54010208

P.S. 

รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ ที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำ และคำปรึกษา ความรู้ต่างๆ การตรวจทานแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการและสถานที่ทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ รวมทั้งนักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอกห้อง T-113 ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแก้ไขข้อผิดพลาด ทางคณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นายจตุพร ด้วงทอง
นายจิรภูมิ บุตรโท
ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบค้นหาทิศทางคลื่นวิทยุโดยเทคนิควิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์
RADIO DIRECTION FINDING SYSTEM USING SOFTWARE-DEFINED RADIO

โดย นายจตุพร ดั่งทอง 54010162
นายจิรภูมิ บุตรโท 54010208

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาระบบค้นหาทิศทางคลื่นวิทยุโดยใช้เครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ที่สามารถปรับความถี่คลื่นวิทยุได้หลากหลาย โดยสามารถเลือกความถี่ที่จะใช้ค้นหาได้ การทำงานของระบบจะใช้สายอากาศทั้งหมด 4 ต้นวางท่ามุมตั้งฉากกัน โดยสัญญาณที่รับได้ในแต่ละต้นจะถูกเลือกสลับกันเสมือนกับการนำสายอากาศต้นเดียวเคลื่อนที่เป็นวงกลมเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เทียม เมื่อนำสัญญาณวิทยุจากวงจรสลับสายอากาศมาตีมอดูเลตด้วยเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์จะได้สัญญาณที่มีความถี่ตรงกับความเร็วในการหมุนสายอากาศ การหาทิศทางของเครื่องส่งวิทยุจะใช้วิธีการนำสัญญาณที่ถูกตีมอดูเลตเทียบความต่างเฟสสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการหมุนสายอากาศออกมาเป็นมุมกวาดได้

ABSTRACT

This project develops the radio direction finding system using software-defined radio (SDR), allowing users to select the frequency in order to search for the direction of the transmitter. This system has 4 antennas placed 90 degrees from each other. The radio signal from the antenna switcher is similar to the received signal from a single antenna rotated in a circle which can generate the periodic Pseudo Doppler Effect. The direction in terms of azimuth angle can be calculated by measuring the phase difference between the antenna control signal and the demodulated signal from antenna switcher using MATLAB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เทียม	2
2.1.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์	2
2.1.2 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เทียม	5
2.2 SDR : SOFTWARE-DEFINED RADIO	12
2.2.1 ภาพรวม	12
2.2.2 หลักการทำงาน	13
2.2.2.1 แนวคิด	13
2.2.2.2 สถาปัตยกรรมของเครื่องรับสัญญาณ	14
2.2.3 RTL-SDR	15
2.2.3.1 REALTEK RTL2832U	15
2.2.3.2 ข้อมูลจำเพาะ	15
2.2.3.3 เครื่องรับ	16
2.2.3.4 การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	17
2.2.4 หลักการทำงานของเทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ในเชิงคณิตศาสตร์	18
2.3 วงจรส่งผ่านสัญญาณวิทยุจากสายอากาศมายังเครื่องรับ	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์	24
3.1 การออกแบบ	26
3.1.1 การออกแบบและจำลองการทำงานของระบบโดยใช้ SIMULINK	26
3.1.1.1 การจำลองสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตซ์ สายอากาศ	26
3.1.1.2 การจำลองการทำงานของเครื่องรับ RTL-SDR	29
3.1.1.3 การเปรียบเทียบเฟส	31
3.1.2 สายอากาศและการออกแบบตำแหน่งในการวาง	33
3.1.3 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมสายอากาศ	35
3.1.4 อุปกรณ์ตัดต่อสัญญาณจากสายอากาศ	38
3.1.5 RTL-SDR 2832U	41
3.1.6 การนำอุปกรณ์ทั้งหมดมาเชื่อมต่อกัน และการประมวลผล ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ	41
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	44
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	45
3.3.1 การจัดเก็บผลการทดลองวัดสัญญาณควบคุมสายอากาศจาก วงจรควบคุมสายอากาศ	45
3.3.2 การจัดเก็บผลการทดลองวัดสัญญาณควบคุมสายอากาศจาก วงจรควบคุมสายอากาศ	47
3.3.3 สัญญาณวิทยุที่รับมาได้หลังจากผ่านวงจรควบคุมสายอากาศ	50
3.3.4 การทดสอบเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์	52
3.3.5 การใช้โปรแกรมแมทแล็บปรับเข้าสัญญาณ และประมวลผล ออกมาเป็นทิศทาง	53
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	56
4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง	56
4.2 ผลการทดลองการอ่านสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ SDR	58
4.3 การประมวลผลและแสดงผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ	59

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	หน้า
	5.1 สรุปผล	68
	5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม		69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์	2
2.2 (ก) สายอากาศที่หมุน และ 2.2 (ข) การเปลี่ยนแปลงความถี่ดอปเพลอร์	3
2.3 (ก) สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ และ 2.3 (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณ	6
2.4 กราฟเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 0 องศา ($\phi = 0$)	8
2.5 กราฟเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 30 องศา ($\phi = 30$)	8
2.6 กราฟเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 45 องศา ($\phi = 45$)	9
2.7 กราฟเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 60 องศา ($\phi = 60$)	10
2.8 กราฟเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 90 องศา ($\phi = 90$)	11
2.9 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิทช์สายอากาศ	11
2.10 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิทช์สายอากาศ	12
2.11 แผนภาพบล็อกการทำงานของเทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์	13
2.12 แผนภาพบล็อกสถาปัตยกรรมของ SDR	13
2.13 (ก) RTL-SDR และ (ข) ส่วนประกอบต่างๆภายใน	15
2.14 แผนภาพบล็อกกระบวนการแยกสัญญาณขาวสารออกจากสัญญาณพาห้	16
2.15 แผนภาพบล็อกเครื่องรับแบบ SUPERHETERODYNE	16
2.16 แผนภาพบล็อกการประมวลผลสัญญาณใน SIMULINK MATLAB	17
2.17 แผนภาพบล็อกการดีมอดูเลตแบบเอฟเอ็มในทางคณิตศาสตร์ (รูปบน) และใน SIMULINK MATLAB (รูปล่าง)	17
2.18 แผนภาพบล็อกการแยกสัญญาณ $I(t)$ จากสัญญาณ $S(t)$	19
2.19 แผนภาพบล็อกการแยกสัญญาณ $Q(t)$ จากสัญญาณ $S(t)$	20
2.20 แผนภาพบล็อกในการแยกสัญญาณเบสแบนด์ออกมาจากคลื่นพาห้	21
2.21 องค์ประกอบ $I(t)$ และ $Q(t)$ ในรูปเชิงขั้ว	21
2.22 วงจรส่งผ่านสัญญาณวิทยุ	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของไดโอด 1N4148 ภายใต้การไบอัสและไม่มี การไบอัสกระแสไฟฟ้า	23
3.1 แผนผังการทำงานของระบบ	25
3.2 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบ	26
3.3 ตำแหน่งของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ	27
3.4 แผนภาพบล็อกการจำลองโดย SIMULINK	27
3.5 แผนภาพบล็อกจำลองเฟสของสัญญาณจากสายอากาศแต่ละต้น	28
3.6 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ	29
3.7 แผนภาพบล็อกจำลองการทำงานของ RTL-SDR	29
3.8 แผนภาพบล็อกของ RTL-SDR ที่ใช้รับสัญญาณจริง	30
3.9 เฟสของสัญญาณที่ได้จากการจำลองใน SIMULINK	30
3.10 แผนภาพบล็อกการแปลงสัญญาณให้เป็นจำนวนเชิงซ้อน	31
3.11 สายอากาศโมโนโพล	34
3.12 ตำแหน่งการวางสายอากาศ	34
3.13 คริสตัลออสซิลเลเตอร์	35
3.14 ไอซี 7490 ที่ใช้หารสัญญาณนาฬิกา 10 เท่า	36
3.15 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศ	37
3.16 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศที่ใช้งานจริงจากที่ออกแบบไว้	38
3.17 การจำลองการหมุนสายอากาศด้วยวงจรตัดต่อสัญญาณ	38
3.18 วงจรควบคุมสายอากาศ	39
3.19 วงจรควบคุมสายอากาศที่ออกแบบเพื่อใช้งานจริงจากที่ออกแบบไว้	40
3.20 วงจรควบคุมสายอากาศที่ออกแบบเพื่อใช้งานจริง	40
3.21 เครื่องรับวิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์รับสัญญาณวิทยุจากวงจรควบคุม สายอากาศ	41
3.22 การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์เพื่อให้โปรแกรมแมทแล็บทำการประมวลผล	42
3.23 แผนภาพของโปรแกรมแมทแล็บเพื่อนำสัญญาณต่างๆ มาประมวลผล	42
3.24 ส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีมุม 324 องศา	43
3.25 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้	44
3.26 เครื่องมือที่ใช้เก็บผลการทดลอง	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1 (สีแดง)	45
3.28 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 2 (สีแดง)	45
3.29 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 3 (สีแดง)	46
3.30 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 4 (สีแดง)	46
3.31 การนอร์มอไลซ์ค่าก่อนที่จะใช้ทดสอบในวงจร	47
3.32 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อไม่มีการจ่ายไฟให้ช่องควบคุม	48
3.33 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 1 ในวงจรควบคุมสายอากาศ	48
3.34 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 2 ในวงจรควบคุมสายอากาศ	49
3.35 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 3 ในวงจรควบคุมสายอากาศ	49
3.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 4 ในวงจรควบคุมสายอากาศ	50
3.37 สเปกตรัมของสัญญาณที่สร้างโดยเครื่อง SIGNAL GENERATOR	51
3.38 สเปกตรัมของสัญญาณที่รับและผ่านวงจรควบคุมสายอากาศ	51
3.39 หน้าโปรแกรม SDRSHARP ดึงข้อมูลสัญญาณจากเครื่องรับ	52
3.40 โปรแกรม SOUND CARD OSCILLOSCOPE ที่ใช้วัดสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1	53
3.41 สัญญาณควบคุมสายอากาศ (สีเหลือง) และสัญญาณที่ถูกดึงข้อมูลจากเครื่องรับ (สีฟ้า)	54
3.42 ทิศทางของเครื่องส่งสัญญาณ	55
4.1 การติดตั้งเครื่องรับวิทยุ	56
4.2 การติดตั้งตำแหน่งเครื่องส่งวิทยุ	57
4.3 มุมมองของตำแหน่งเครื่องส่งและเครื่องรับ	57
4.4 สัญญาณจากเครื่องรับหลังถูกดึงข้อมูล	58
4.5 สัญญาณหลังจากผ่านฟิลเตอร์เลือกความถี่	59
4.6 การเก็บค่ามุมในตัวแปร ANS และค่าเฉลี่ยในตัวแปร AVG	60
4.7 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา	61
4.9 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา	65
4.10 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา	63
4.11 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 180 องศา	65
4.12 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 180 องศา	65
4.11 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 270 องศา	67
4.12 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 270 องศา	67



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีการวางสายอากาศและความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด	35
4.1	การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา	60
4.2	การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา	62
4.3	การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 180 องศา	64
4.4	การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 270 องศา	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการให้บริการฉุกเฉินรวมทั้งหน่วยค้นหาและกู้ภัยที่ใช้ระบบการค้นหาทิศทางแหล่งที่มาของคลื่นวิทยุ (Radio direction finding : RDF) เพื่อหาตำแหน่งรถพยาบาล บุคลากรและผู้ประสบภัยพิบัติ ในอดีตนั้นต้องเผชิญปัญหาเรื่องเครื่องมือที่มีราคาแพง ที่ต้องใช้งานร่วมกับเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่และยุ่งยากซับซ้อน แต่ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีการสื่อสารได้พัฒนามาสู่ยุคดิจิทัล (Digital) ประกอบกับความสามารถด้านการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ ที่สามารถประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่และยังทดแทนอุปกรณ์แอนะล็อก (Analog) ได้มากขึ้น จึงได้มีการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ทดแทนในระบบสื่อสารต่างๆ และจากการที่ระบบถูกแทนที่ด้วยระบบดิจิทัลมากขึ้น จึงทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบโปรแกรม และสามารถนำข้อมูลมาประมวลผลในคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายที่ลดต่ำลง

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงพัฒนาระบบการค้นหาทิศทางที่ใช้เครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ SDR (Software-defined radio) และทดแทนวงจรแอนะล็อกด้วยการประมวลผลโดยการจำลองในโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อลดต้นทุนในการพัฒนาระบบนี้ขึ้นมา

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้ SDR สำหรับสร้างระบบค้นหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ (Radio direction finding) ซึ่งแต่เดิมยังเป็นแบบแอนะล็อกให้เป็นแบบดิจิทัลโดยอาศัยหลักการ Pseudo Doppler Effect ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการค้นหาหรือระบุพิกัดเป็นต้น

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1) สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณวิทยุ
- 2) ดัดแปลง SDR ให้สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาได้
- 3) เขียนโปรแกรมควบคุมการเชื่อมต่อ SDR
- 4) คำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

บทที่ 2

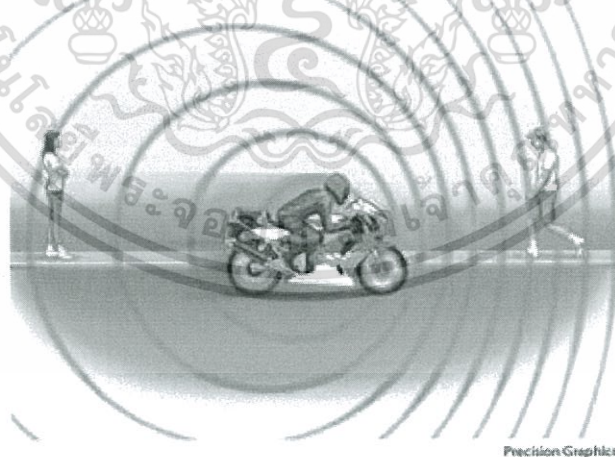
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เทียม

2.1.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) หรือบางครั้งเรียกว่า การเคลื่อนดอปเพลอร์ (Doppler shift) เป็นปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์อย่างหนึ่งที่ตั้งชื่อตาม คริสเตียน ดอปเพลอร์ เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นในมุมมองของผู้สังเกตเมื่อมีการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดคลื่นนั้น ผู้สังเกตได้รับความถี่คลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นต่างจากความถี่เดิม มีความเร็วสัมพันธ์กันไม่เป็นศูนย์และสังเกตได้ว่าคลื่นมีความถี่ต่างไปจากตอนที่อยู่นิ่งหรือตอนที่ความเร็วสัมพันธ์เป็นศูนย์

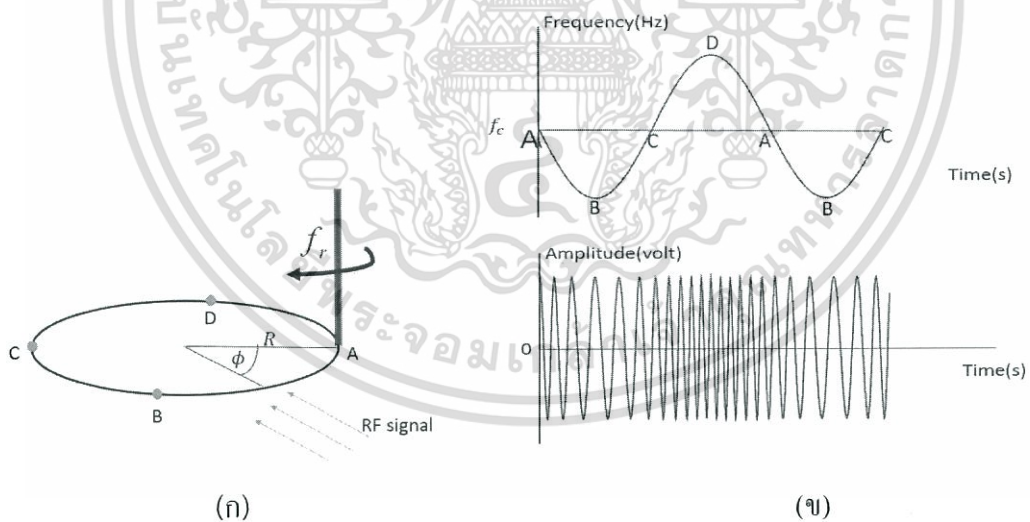
ตัวอย่างของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อรถที่วิ่งเข้าหาผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง แตรรถจะมีความถี่สูงเมื่อรถวิ่งเข้าหาผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง การเปลี่ยนแปลงความถี่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถทำให้ความยาวคลื่นสั้นลง ในทางกลับกันเสียงแตรมีความถี่ต่ำเมื่อรถวิ่งออกจากผู้สังเกต เกิดขึ้นเนื่องจากรถวิ่งออกไปจากผู้สังเกตเป็นผลให้ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ดังนั้น เสียงจึงมีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ [12]

ผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เกิดขึ้นได้กับคลื่นวิทยุในทำนองเดียวกับคลื่นเสียง โดยเกิดขึ้นเมื่อสายอากาศของเครื่องรับเคลื่อนที่ไปหาแหล่งกำเนิดสัญญาณหรือเคลื่อนที่ออกไปจากสายอากาศของเครื่องส่ง สัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศที่เคลื่อนที่ไปหาเครื่องส่ง เครื่องรับจะรับสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าสัญญาณที่ส่งจริง สัญญาณที่เครื่องรับรับจากสายอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากเครื่องส่งจะปรากฏเป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าสัญญาณที่ส่งจริง

ตัวอย่างของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้นกับคลื่นวิทยุ สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณเคลื่อนที่แบบวงกลม ดังในรูปที่ 2.2 (ก) พิจารณาสายอากาศที่ตำแหน่งใกล้เคียงแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สุด ความถี่ของสัญญาณที่ได้รับที่จุดนี้เท่ากับความถี่ที่ส่งจริงเพราะสายอากาศจะไม่เคลื่อนที่เข้าไปหรือออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ความถี่ของสัญญาณที่รับลดลงเมื่อสายอากาศเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B และ จากจุด B ไปที่จุด C ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อสายอากาศผ่านจุด B ความถี่ของสัญญาณที่รับได้ที่จุด C เป็นความถี่เดียวกับสัญญาณที่ส่งจริง (ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) เพราะสายอากาศไม่ได้เคลื่อนที่เข้าไปหรือออกห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ เมื่อสายอากาศเคลื่อนที่จากจุด C ไปยังจุด D และจากจุด D กลับไปยังจุด A ความถี่ของสัญญาณที่รับเพิ่มขึ้น ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดเกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อสายอากาศผ่านจุด D การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นฟังก์ชันของการหมุนสายอากาศ สัญญาณที่เครื่องรับรับได้จึงมีรูปคลื่นที่คล้ายกับสัญญาณที่มีการมอดูเลตแบบเฟม (FM Modulation) แสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 (ก) สายอากาศที่หมุน และ 2.2 (ข) ความถี่ดอปเพลอร์

จากรูปที่ 2.2 (ข) รูปบน คือกราฟของความถี่ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการหมุนสายอากาศเป็นวงกลม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความถี่นั้นเป็นไปตามฟังก์ชัน $-dF \sin(2\pi f_r t + \phi)$ เมื่อ dF คือความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์) (เกิดขึ้นที่จุด B และจุด D ในรูปที่ 2.2 (ข) รูปบน), f_r คือ ความถี่ในการหมุนสายอากาศ (เฮิรตซ์), ϕ คือ มุมใดๆ ที่สัญญาณเข้ามาเทียบกับจุด A ดังรูปที่ 2.2 (ก) การคำนวณค่า dF สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$dF = \frac{2\pi f_r R}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ R คือรัศมีของการหมุนสายอากาศ (เมตร), λ คือความยาวคลื่นวิทยุ (เมตร) จากรูปที่ 2.2 (ข) รูปล่าง คือกราฟสัญญาณที่เครื่องรับรับได้ซึ่งมีรูปคลื่นที่คล้ายกับสัญญาณที่มีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (FM Modulation) ดังนั้น จึงต้องสร้างสัญญาณที่ตอบเพลอร์โดยอาศัยพื้นฐานมาจากการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม โดยกำหนดให้สัญญาณเบสแบนด์ที่จะมอดูเลตด้วย คือ $m(t)$ ซึ่งก็คือฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงความถี่ของตอบเพลอร์ดังสมการ 2.2

$$m(t) = -dF \sin(2\pi f_r t + \phi) \quad (2.2)$$

หรือ

$$m(t) = -\frac{2\pi f_r R}{\lambda} \sin(2\pi f_r t + \phi) \quad (2.3)$$

สมการของสัญญาณเอฟเอ็ม $x_{FM}(t)$ ดังสมการ 2.4

$$x_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + k_f \int m(t) dt) \quad (2.4)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดของสัญญาณเอฟเอ็ม, ω_c คือความถี่ของคลื่นพาห์, k_f คือค่าคงที่ 2π

เมื่อแทนสมการ 2.3 ในสมการ 2.4 จะได้

$$x_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + k_f \int -\frac{2\pi f_r R}{\lambda} \sin(2\pi f_r t + \phi) dt) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทำปริพันธ์ไม่จำกัดเขตของ $m(t)$ ทำให้ได้เฟสเริ่มต้น θ_0 แสดงในสมการ 2.6

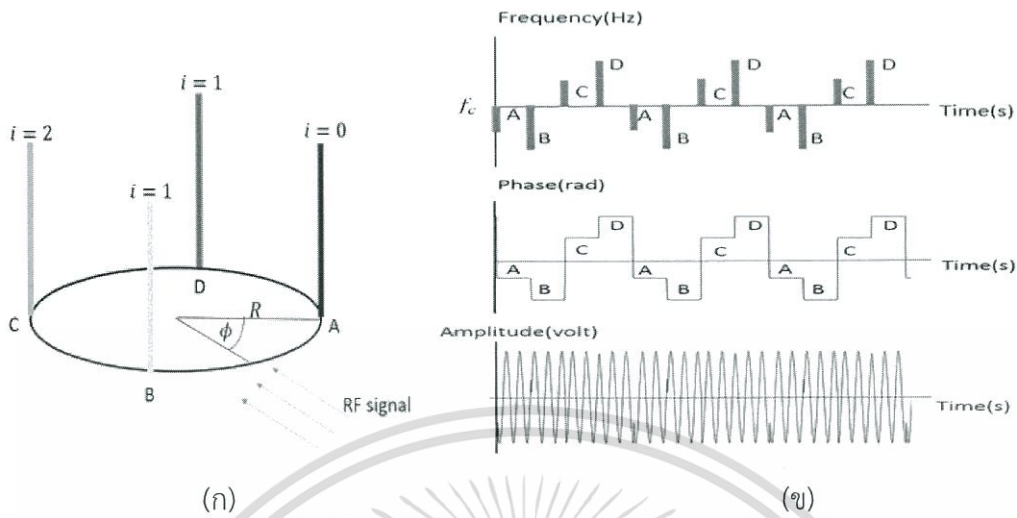
$$x_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(2\pi f_r t + \phi) + \theta_0) \quad (2.6)$$

สุดท้ายแล้วสมการของสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้เมื่อมีการเคลื่อนที่สายอากาศเป็นวงกลมเมื่อรวมผลของสัญญาณรบกวน $n(t)$ ดังรูปที่ 2.2 (ข) รูปล่าง แสดงได้ดังสมการ 2.7

$$r(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(2\pi f_r t + \phi) + \theta_0) + n(t) \quad (2.7)$$

2.1.2 ปราบการณดอปเพลอร์เทียม

ปราบการณดอปเพลอร์เทียม เกิดขึ้นจากข้อจำกัดของการหมุนสายอากาศซึ่งบางครั้งเมื่อต้องการให้สัญญาณมีการเบี่ยงเบนความถี่ที่สูงจึงต้องเพิ่มความถี่ในการหมุนสายอากาศ แต่ในทางกายภาพไม่สามารถสร้างให้สายอากาศมีความถี่ในการหมุนมากขนาดนั้นได้ จนกระทั่งเทอร์เรนซ์ โรเจอร์ส นามเรียกขาน WA4BVY เสนอวิธีการของระบบไฟฟ้าในการหมุนสายอากาศซึ่งใช้งานได้เป็นอย่างดี โครงการ DoppleScAnt [7] ของโรเจอร์สใช้สายอากาศแนวตั้ง แปรดตัน โดยแต่ละต้นมีความยาว $1/4-\lambda$ เมตร ทำการจัดรูปแบบเป็นวงกลม โดยที่สายอากาศจะสลับกันรับสัญญาณเป็นลำดับที่ละต้น โดยลำดับของการรับสัญญาณจะถูกควบคุมโดยสัญญาณนาฬิกา โครงการ DoppleScAnt [7] จำลองสายอากาศต้นเดียวที่มีความยาว $1/4-\lambda$ เมตร เคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยการสลับให้สายอากาศแต่ละต้นรับสัญญาณ โดยทำการวางสายอากาศ 4 ตำแหน่งด้วยกัน คือที่ตำแหน่ง A, B, C, D ตามรูปที่ 2.3 (ก) เมื่อมีสัญญาณเข้ามา สายอากาศแต่ละต้นจะรับสัญญาณที่มีเฟสที่ต่างกัน



รูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ และ 2.3 (ข) เฟสของสัญญาณ

สัญญาณวิทยุจากเครื่องส่งที่เข้ามายังสายอากาศทั้ง 4 ต้น เอาดัตของสายอากาศแต่ละต้น ที่ถูกควบคุมให้รับสัญญาณที่ละต้นเป็นวงกลมตามลำดับจะมีการส่งผ่านสัญญาณไปยังโมดูลเครื่องรับ สายอากาศแต่ละต้นจะรับสัญญาณใน 1 ช่วงเวลาสั้นๆ สลับกันไปเรื่อยๆ สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแต่ละต้นจะมีเฟสที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.8 ซึ่งสัญญาณที่ได้ จะเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบไม่ต่อเนื่อง เพราะว่ามีสลับสายอากาศให้รับสัญญาณที่ละต้น แต่ละต้นจะรับสัญญาณที่มีเฟสเริ่มไม่ตรงกัน

$$r_i(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\frac{2\pi i}{NA} + \phi) + \theta_0) + n_i(t) \tag{2.8}$$

เมื่อ $r_i(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการสวิตช์สายอากาศ, NA คือจำนวนของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ, ϕ คือมุมใดๆที่สัญญาณที่เข้ามาทำมุมกับสายอากาศต้นที่ $i=0$, $n_i(t)$ คือสัญญาณรบกวน

จากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ถ้านำสายอากาศหนึ่งต้นไปเคลื่อนที่รอบวงกลม สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนความถี่ สัญญาณที่ได้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณที่มอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (FM modulation) แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติเราใช้วิธีการสลับสายอากาศให้รับสัญญาณที่ละต้น สัญญาณที่รับได้จึงเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.3 (ข) จะนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ไม่ต่อเนื่องโดยใช้สมการ 2.8 อธิบายประกอบ และเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายพิจารณากรณีที่ค่า $m(t) = 1$, $\phi = 0$, $\theta_0 = 0$

และ $n_i(t)=0$ ดังนั้นสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศในแต่ละตำแหน่ง แสดงได้ดังสมการ 2.9 ถึง 2.12

$$r_0(t) = \cos(\omega_c t + \frac{2\pi R}{\lambda}) \quad (2.9)$$

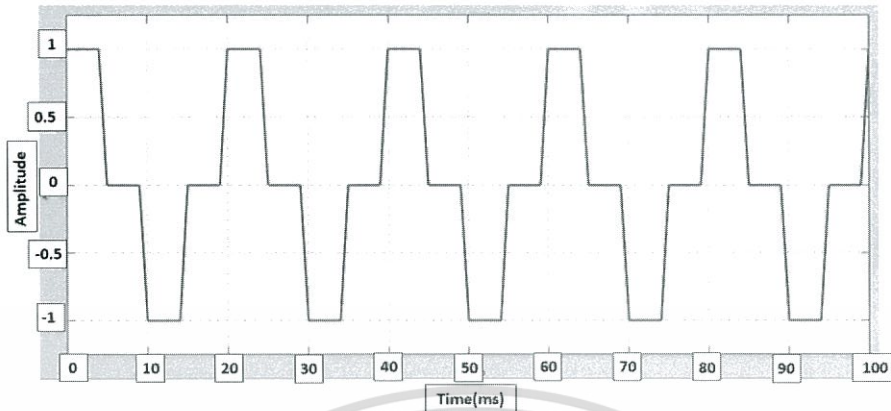
$$r_1(t) = \cos(\omega_c t) \quad (2.10)$$

$$r_2(t) = \cos(\omega_c t - \frac{2\pi R}{\lambda}) \quad (2.11)$$

$$r_3(t) = \cos(\omega_c t) \quad (2.12)$$

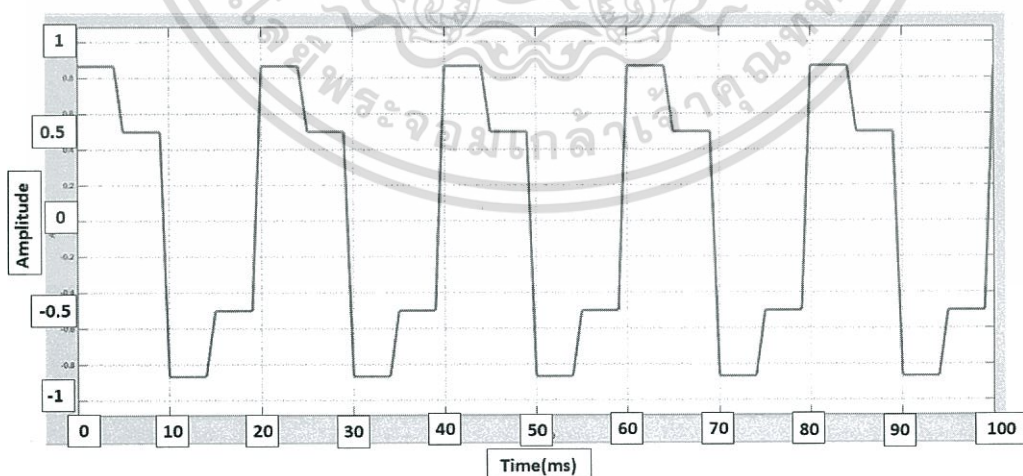
จะเห็นได้ว่าสัญญาณ $r_i(t)$ ในแต่ละตำแหน่งประกอบด้วยแอมพลิจูด ความถี่ และมุมเฟส เพื่อให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสชัดเจน กำหนดให้ $\omega_c = 4000$ กิโลเฮิรตซ์ $f_r = 50$ เฮิรตซ์ $2\pi R / \lambda = 1$ เมื่อมุม ϕ ของสัญญาณที่เข้ามามีค่าต่างๆ ในช่วง 0 องศาถึง 90 องศา แสดงในรูปที่ 2.4 ถึงรูปที่ 2.8

ในรูปที่ 2.4 นั้นกราฟที่ได้มาจาก $2\pi R \cos(2\pi i / NA + \phi) / \lambda$ ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละต้น โดยมีคาบเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ เนื่องจาก สายอากาศมีทั้งหมด 4 ต้น โดยแต่ละต้นวางทำมุมกัน 90 องศา มีรูปร่างลักษณะนี้เนื่องจาก $\phi = 0$ องศา ในรูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ตำแหน่ง A รับสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\cos(0)$ หรือ 1 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง B รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเป็น $\cos(\pi/2)$ หรือ 0 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง C รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(\pi)$ หรือ -1 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง D รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(3\pi/2)$ หรือ 0 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอไลซ์แล้ว



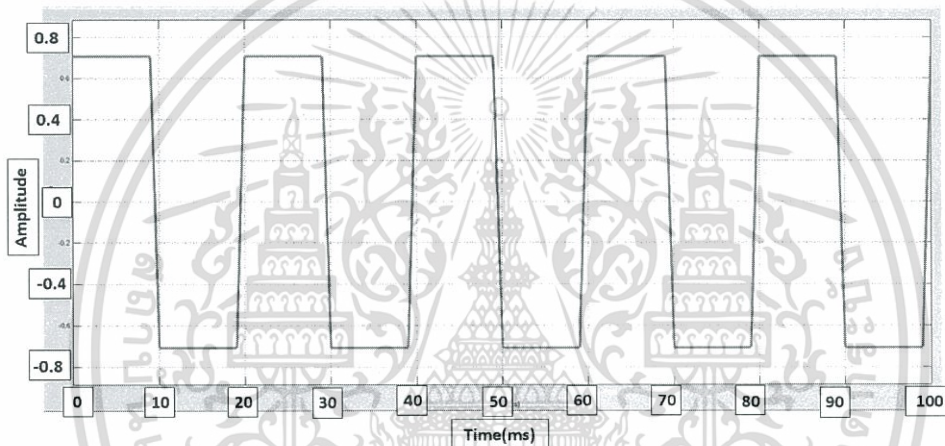
รูปที่ 2.4 เฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 0 องศา ($\phi = 0$)

ในรูปที่ 2.5 นั้นกราฟที่ได้มาจาก $2\pi R \cos(2\pi i / NA + \phi) / \lambda$ ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละต้น โดยมีคาบเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากสายอากาศมีทั้งหมด 4 ต้น โดยแต่ละต้นวางทำมุมกัน 90 องศา มีรูปร่างลักษณะนี้เนื่องจาก $\phi = 0$ องศา ในรูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ตำแหน่ง A รับสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\cos(\pi/6)$ หรือ 0.866 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง B รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(2\pi/3)$ หรือ -0.5 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง C รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(7\pi/6)$ หรือ -0.866 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง D รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(5\pi/3)$ หรือ 0.5 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว



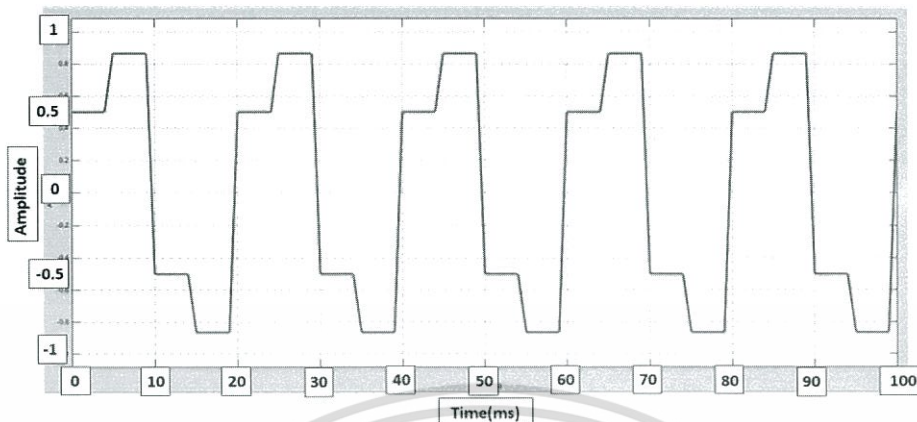
รูปที่ 2.5 เฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 30 องศา ($\phi = 30$)

ในรูปที่ 2.6 นั้นกราฟที่ได้มาจาก $2\pi R \cos(2\pi i / NA + \phi) / \lambda$ ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละต้น โดยมีคาบเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เนื่องจาก สายอากาศมีทั้งหมด 4 ต้น โดยแต่ละต้นวางทำมุมกัน 90 องศา มีรูปร่างลักษณะนี้เนื่องจาก $\phi = 0$ องศา ในรูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ตำแหน่ง A รับสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\cos(\pi/4)$ หรือ 0.707 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง B รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(3\pi/4)$ หรือ -0.707 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง C รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(5\pi/4)$ หรือ -0.707 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง D รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(7\pi/4)$ หรือ 0.707 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว



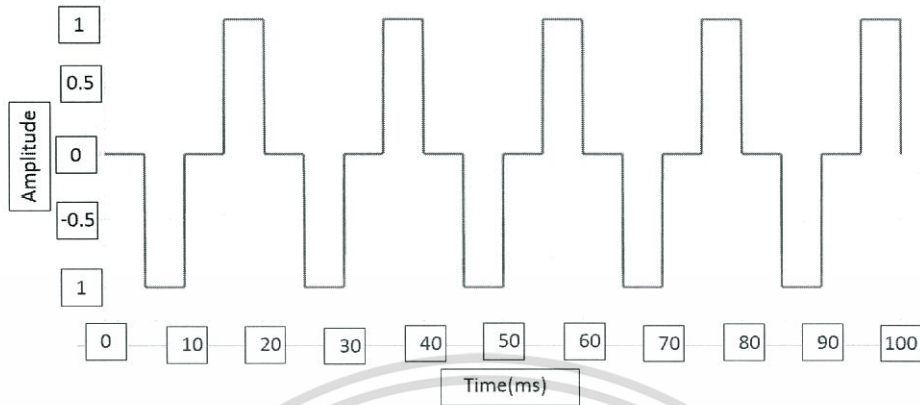
รูปที่ 2.6 เฟสของสัญญาณที่ได้รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 45 องศา ($\phi = 45$)

ในรูปที่ 2.7 นั้นกราฟที่ได้มาจาก $2\pi R \cos(2\pi i / NA + \phi) / \lambda$ ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละต้น โดยมีคาบเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เนื่องจาก สายอากาศมีทั้งหมด 4 ต้น โดยแต่ละต้นวางทำมุมกัน 90 องศา มีรูปร่างลักษณะนี้เนื่องจาก $\phi = 0$ องศา ในรูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ตำแหน่ง A รับสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\cos(\pi/3)$ หรือ 0.5 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง B รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(5\pi/6)$ หรือ -0.866 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง C รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(4\pi/3)$ หรือ -0.5 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง D รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(11\pi/6)$ หรือ 0.866 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว



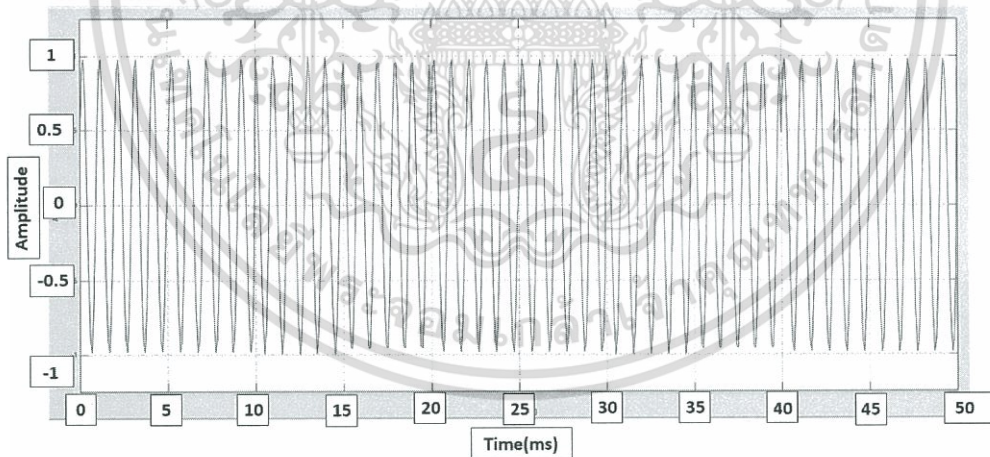
รูปที่ 2.7 เฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 60 องศา ($\phi = 60$)

ในรูปที่ 2.8 นั้นกราฟที่ได้มาจาก $2\pi R \cos(2\pi i / NA + \phi) / \lambda$ ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละต้น โดยมีคาบเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เนื่องจาก สายอากาศมีทั้งหมด 4 ต้น โดยแต่ละต้นวางทำมุมกัน 90 องศา มีรูปร่างลักษณะนี้เนื่องจาก $\phi = 0$ องศา ในรูปที่ 2.3 (ก) สายอากาศที่ตำแหน่ง A รับสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\cos(\pi/2)$ หรือ 0 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง B รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(\pi)$ หรือ -1 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง C รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(3\pi/2)$ หรือ 0 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว สายอากาศที่ตำแหน่ง D รับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $\cos(2\pi)$ หรือ 1 ซึ่งเป็นค่าเฟสที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว



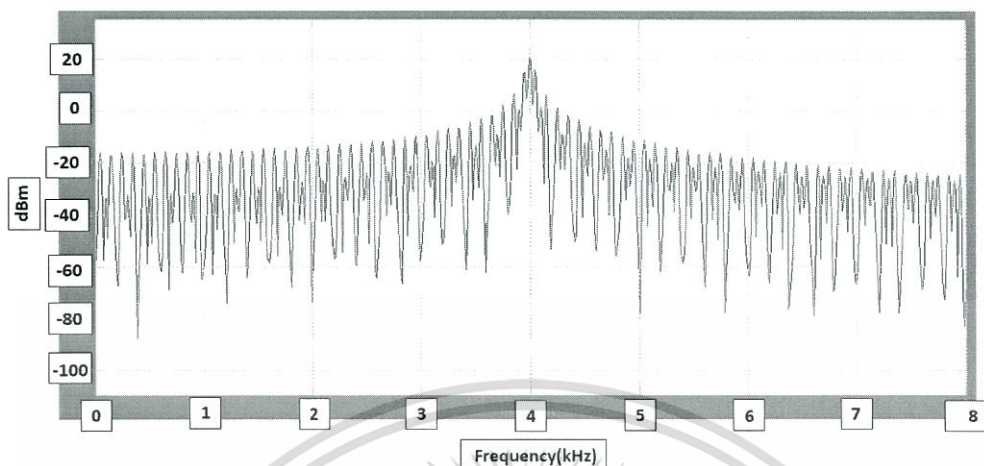
รูปที่ 2.8 เฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อมุมที่สัญญาณเข้ามามีค่าเป็น 90 องศา ($\phi = 90$)

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ จะได้สัญญาณที่เฟสเริ่มของสายอากาศแต่ละต้นไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งกราฟที่ได้มาจากสมการที่ 2.9 ถึง 2.12 เมื่อวัดสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้นี้ จะได้สเปกตรัมของสัญญาณดังแสดง ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ

2.2 เทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

เทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (SDR) คือระบบการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุซึ่งมีองค์ประกอบที่ได้มีการนำมาใช้โดยทั่วไปในฮาร์ดแวร์ (ตัวอย่างเช่น ตัวผสมสัญญาณ, ตัวกรองสัญญาณ, ตัวขยายสัญญาณ, ตัวมอดูเลต/ตัวดีมอดูเลต, ตัวตรวจจับ, ฯลฯ) ที่จะถูกแทนที่โดยวิธีการของซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือระบบสมองกลฝังตัว เนื่องจากการพัฒนาของอุปกรณ์ดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์สามารถพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้กระบวนการต่างๆที่เคยเป็นไปได้เฉพาะในทางทฤษฎีสามารถทำได้จริงในทางปฏิบัติ

2.2.1 ภาพรวม

ระบบ SDR พื้นฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลพร้อมกับการดเสียงหรืออื่นๆที่แปลงจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และคลื่นความถี่วิทยุที่อยู่ในส่วนแรก (RF Front end) การประมวลผลสัญญาณจะถูกส่งไปประมวลผลในอุปกรณ์ประมวลผลทั่วไปแทนที่จะต้องทำในฮาร์ดแวร์ที่ทำหน้าที่นั้นโดยเฉพาะ เช่น การออกแบบผลิตรหัสวิทยุที่สามารถรับและส่งวิทยุที่มีการมอดูเลตแตกต่างกันโดยใช้ซอฟต์แวร์เพียงอย่างเดียว

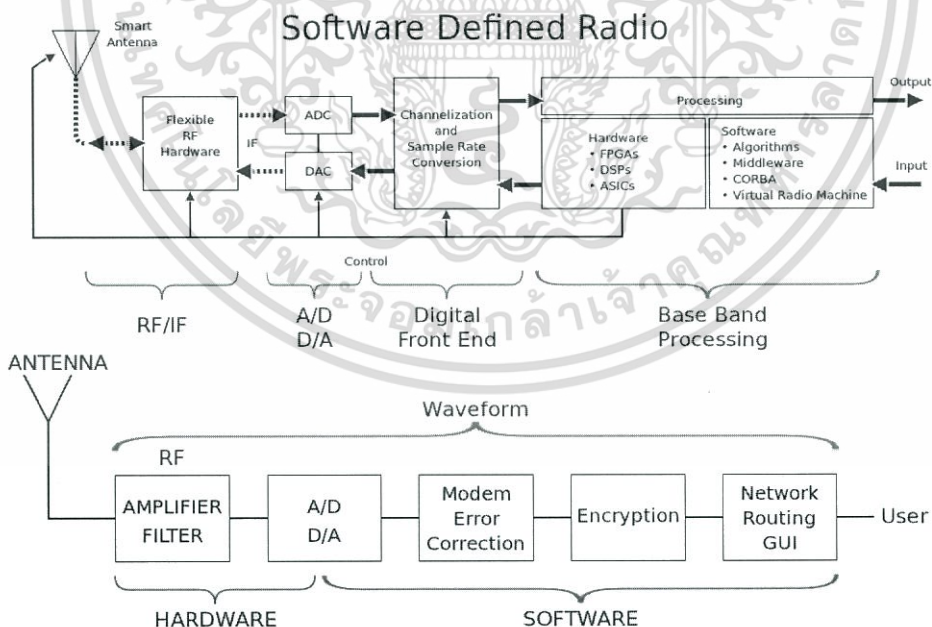
วิทยุซอฟต์แวร์มีประโยชน์ที่สำคัญสำหรับการทหารและการให้บริการโทรศัพท์มือถือซึ่งจะต้องให้บริการที่หลากหลายของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณวิทยุแบบเวลา

จริง และในอนาคตเทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์คาดว่าจะมีผู้สนับสนุน เช่น SDRForum เพื่อให้กลายเป็นเทคโนโลยีที่โดดเด่นในการสื่อสารทางวิทยุ

2.2.2 หลักการทำงาน

2.2.2.1 แนวคิด

รูปแบบเครื่องรับในอุดมคติจะมีการใส่ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต่อจากสายอากาศ หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะอ่านค่าที่ได้และจากนั้นซอฟต์แวร์จะเปลี่ยนชุดข้อมูลจากค่าที่ได้ไปสู่รูปแบบอื่นๆ ที่โปรแกรมต้องการ เครื่องส่งในอุดมคติจะมีลักษณะคล้ายกันกับเครื่องรับในอุดมคติ หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะสร้างชุดของตัวเลข ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะถูกส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่เชื่อมต่อกับสายอากาศวิทยุ เครื่องรับในอุดมคติจะไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากขีดจำกัดของเทคโนโลยี ปัญหาหลักคือทิศทางทั้งการส่งข้อมูลไปยังสายอากาศและการรับสัญญาณจากสายอากาศเข้ามา ความยากในการแปลงระหว่างดิจิทัลและแอนะล็อกในอัตราที่สูงพอและในขณะเดียวกันต้องมีความแม่นยำสูงด้วยและไม่มีกระบวนการทางกายภาพ เช่น การรบกวนและการเรโซแนนซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แผนภาพบล็อกที่แสดงหลักการดำเนินงานของวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 2.11

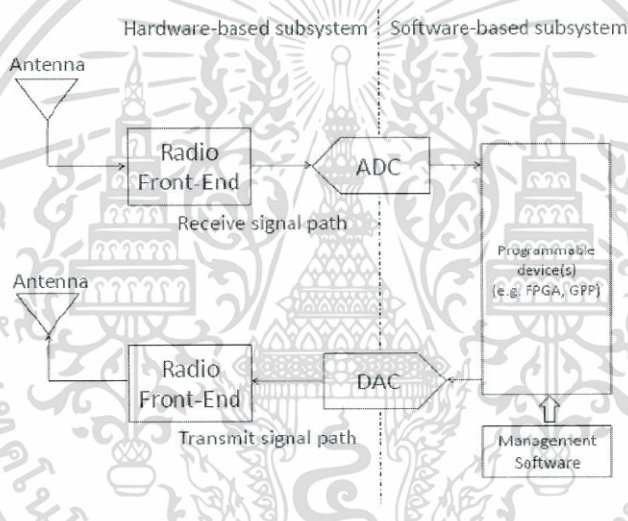


รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกการทำงานของเทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 สถาปัตยกรรมของเครื่องรับสัญญาณ

เครื่องรับส่วนใหญ่ใช้ออสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้ ร่วมกับตัวผสมสัญญาณและตัวกรองความถี่ในการปรับสัญญาณที่ต้องการให้เป็นสัญญาณในความถี่กลางหรือความถี่เบสแบนด์ ซึ่งจะมีกระบวนการซักรับตัวอย่างโดยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลดังแสดงในรูปที่ 2.12 อย่างไรก็ตามในการใช้งานบางอย่างไม่จำเป็นที่จะต้องปรับให้เป็นสัญญาณความถี่กลาง โดยสัญญาณวิทยุจะถูกซักรับตัวอย่างโดยตรงด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลหลังจากที่ขยายสัญญาณแล้ว และเนื่องจากตัวแปลงแบบแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขาดไดนามิคเรนจ์ที่จะรับสัญญาณช่วงไมโครโวลต์ เพราะสัญญาณวิทยุที่รับได้มีกำลังในช่วงนาโนวัตต์ ดังนั้นตัวขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (LNA) จะต้องอยู่ก่อนหน้าขั้นตอนการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกสถาปัตยกรรมของ SDR [8]

ตัวอย่างเช่นถ้าสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ต้องการอยู่ในไดนามิคเรนจ์ของตัวขยายสัญญาณ จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนสัญญาณที่ต้องการหรือสัญญาณที่ต้องการอาจจะถูกบล็อกไปเลย วิธีแก้ไขที่เป็นมาตรฐานคือการใส่ตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF) ระหว่างสายอากาศและตัวขยายสัญญาณ แต่ว่าจะลดความยืดหยุ่นของสัญญาณวิทยุ วิทยุซอฟต์แวร์ที่ใช้มักจะมีตัวกรองสัญญาณแอนะล็อกสองหรือสามช่องสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ที่แตกต่างกันซึ่งสามารถเลือกได้ที่ละช่องสัญญาณ

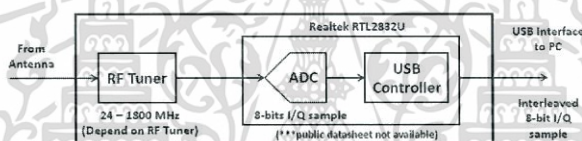
2.2.3 RTL-SDR

2.2.3.1 Realtek RTL2832U

อยู่บนพื้นฐานของดองเกิล DVB-T สามารถใช้เป็น SDR ราคาประหยัด ตั้งแต่มีชิปช่วยให้การถ่ายโอนข้อมูลดิบที่เป็นตัวอย่างของ I (In-phase component) และ Q (Quadrature component) ไปยังโฮสต์ ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างเป็นทางการสำหรับ DAB / DAB + / การติ่มอตุเลตแบบเอฟเอ็มที่สร้างโดย Eric Fry โครงสร้างภายในดังแสดงในรูป 2.13



(ก)



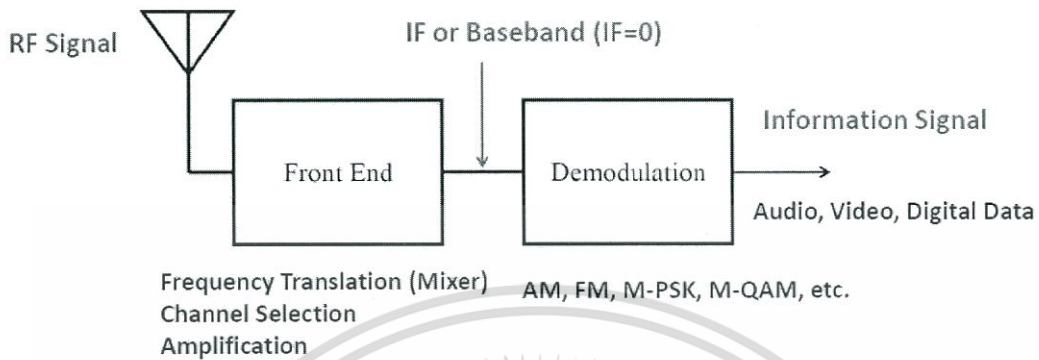
(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) RTL-SDR และ (ข) ส่วนประกอบต่างๆภายใน [9]

2.2.3.2 ข้อมูลจำเพาะ

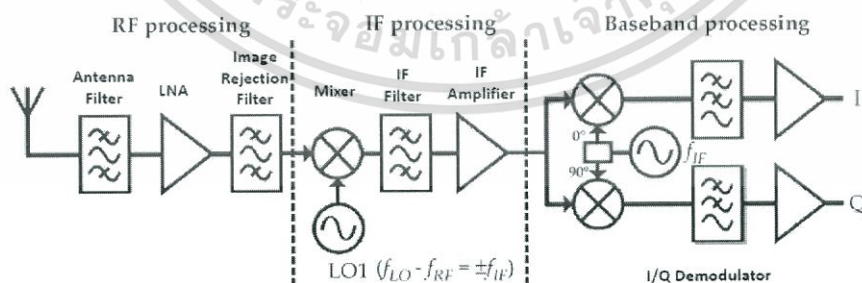
RTL2832U ให้เอาต์พุตเป็นข้อมูล 8 บิต ของตัวอย่าง I และ Q และอัตราการซีกตัวอย่างสูงสุดที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎี คือ 3.2 MS/s อย่างไรก็ตาม อัตราการซีกตัวอย่างที่สูงที่สุดที่ไม่ทำให้ตัวอย่างสูญหายซึ่งได้ทดสอบมาจนถึงตอนนี้ คือ 2.56 MS/s ช่วงความถี่กว้างจะขึ้นอยู่กับเครื่องรับสัญญาณที่ใช้

2.2.3.3 เครื่องรับ



รูปที่ 2.14 แผนภาพบล็อกกระบวนการแยกสัญญาณข่าวสารออกจากสัญญาณพาห้

จุดประสงค์ในการใช้เครื่องรับก็เพื่อแยกเอาสัญญาณข่าวสารออกมาจากสัญญาณคลื่นพาห้ดังแสดงในรูป 2.14 วิธีการที่ใช้มีด้วยกันสองวิธี คือ Superheterodyne วิธีนี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย Armstrong ในปีค.ศ.1918 เครื่องรับวิทยุแบบ Superheterodyne มีใจความสำคัญอยู่ตรงที่ การเปลี่ยนความถี่ RF ที่รับเข้ามาหลาย ๆ ความถี่เป็นเดียวเป็นค่าความถี่กลาง (Intermediate frequency : IF) ความถี่กลางนี้จะสามารถทำให้สูงกว่า (High-side injection) หรือต่ำกว่า (Low-side injection) ความถี่วิทยุที่รับมาก็ได้ ดังแสดงในรูป 2.15 ระบบ Superheterodyne ในสมัยแรก ๆ จะทำให้ความถี่กลางสูงกว่าความถี่วิทยุ แต่ปัจจุบันจะทำให้ความถี่กลางต่ำกว่า เนื่องจากความถี่ต่ำจะมีความยุ่งยากน้อยกว่า เครื่องรับส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้ และอีกวิธีหนึ่งคือ Direct conversion วิธีนี้จะแปลงสัญญาณวิทยุให้เป็นสัญญาณเบสแบนด์โดยตรงโดย ทำให้ใช้อุปกรณ์จำนวนไม่มาก



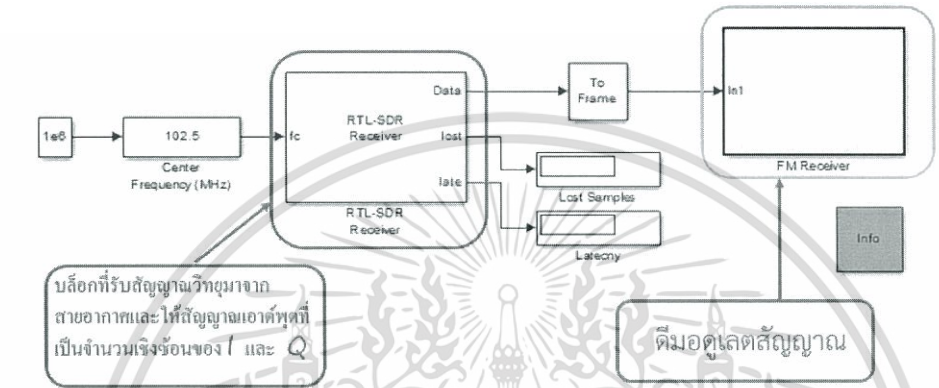
Note : FM Receiver Standard IF = 10.7 MHz
 AM Receiver Standard IF = 455 KHz

รูปที่ 2.15 แผนภาพบล็อกเครื่องรับแบบ Superheterodyne [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

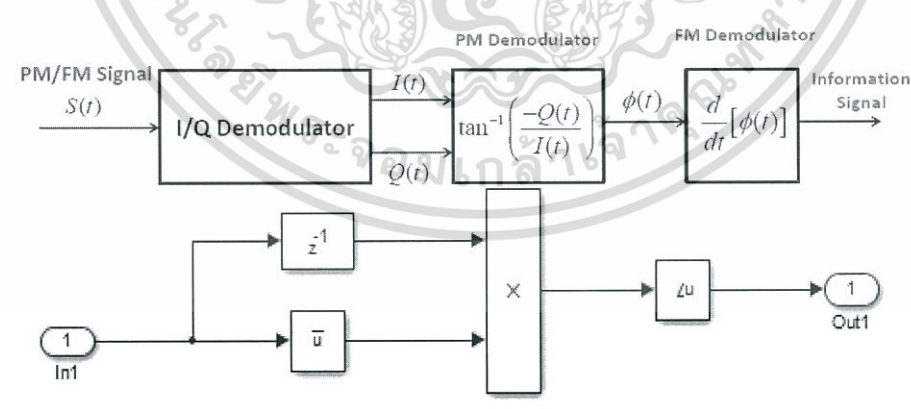
2.2.3.4 การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

การใช้งานอุปกรณ์ RTL-SDR เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางพอร์ต USB ข้อมูล I และ Q ที่เข้ามาจะถูกนำไปประมวลผลโดย Simulink MATLAB ซึ่งบล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณ I และ Q ที่เข้ามาแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพบล็อกการประมวลผลสัญญาณใน Simulink MATLAB

จากรูปที่ 2.16 จะเป็นกระบวนการในการแยกสัญญาณแบบแอมพลิจูดออกมาจากสัญญาณพาห์ ซึ่งค่าที่ได้ออกมาจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนของ I และ Q โดยค่า I ส่วนจริง และ ค่า Q เป็นส่วนจินตภาพ ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบดิจิทัล 8 บิต เพื่อนำไปประมวลผลต่อไปดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพบล็อกการดีมอดูเลตแบบเอฟเอ็มในทางคณิตศาสตร์ (รูปบน) และใน Simulink MATLAB (รูปล่าง)

2.2.4 หลักการทำงานของเทคโนโลยีวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ในเชิงคณิตศาสตร์

สัญญาณวิทยุประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ คลื่นพาห์และสัญญาณข่าวสาร ในส่วนของคลื่นพาห์คือสัญญาณไซน์ซอไซด์ และ สัญญาณข่าวสารคือ สัญญาณเสียง ภาพ วิดีโอ สัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล ฯลฯ การมอดูเลตคือการฝากสัญญาณข่าวสารไปกับคลื่นพาห์ ซึ่งสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้วไม่ว่าจะเป็นการมอดูเลตสัญญาณที่เป็นแอนะล็อกหรือดิจิทัลสามารถที่จะแทนด้วยสมการในเชิงคณิตศาสตร์ในรูปทั่วไป ดังสมการ 2.13

$$S(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \phi(t)) \quad (2.13)$$

เมื่อ $A(t)$ คือแอมพลิจูดของสัญญาณ, ω_c คือความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห์, $\phi(t)$ คือมุมเฟสของสัญญาณ

จากสมการ 2.13 จะพบว่าเราสามารถแทนการมอดูเลตทุกแบบให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ เช่น สัญญาณที่มีการมอดูเลตเชิงขนาด สัญญาณ $S(t)$ จะเป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนตามขนาด ถ้าเป็นสัญญาณที่มีการมอดูเลตเชิงความถี่ สัญญาณ $S(t)$ จะเป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงความถี่ตามฟังก์ชันของเฟส ซึ่งฟังก์ชันของเฟสในกรณีนี้ จะเป็นค่าปริพันธ์ของสัญญาณข่าวสาร

เราสามารถแทนสมการ 2.13 ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ ดังในสมการ 2.14

$$S(t) = A(t) \cos(\omega_c t) \cos(\phi(t)) - A(t) \sin(\omega_c t) \sin(\phi(t)) \quad (2.14)$$

จากสมการ 2.14 จะสังเกตว่าสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณข่าวสารในการมอดูเลตเชิงขนาดคือ $A(t)$ ในการมอดูเลตเชิงความถี่และเฟสคือ $\phi(t)$ เมื่อทำการรวมกลุ่มของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณข่าวสารเข้าด้วยกันและจัดสมการใหม่ดังในสมการ 2.15

$$S(t) = I(t) \cos(\omega_c t) + Q(t) \sin(\omega_c t) \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$I(t) = A(t) \cos(\phi(t)) \quad (2.16)$$

$$Q(t) = -A(t) \sin(\phi(t)) \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.16 จะเห็นว่า $\cos(\phi(t))$ เป็นสัญญาณที่มีเฟสตรงกันกับสัญญาณ $S(t)$ จึงเรียกสัญญาณกลุ่มนี้ว่าเป็นองค์ประกอบเฟสตรงกัน (In-phase component) ในสมการ 2.17 จะเห็นว่า $-\sin(\phi(t))$ มีเฟสตามสัญญาณ $S(t)$ อยู่ 90 องศา จึงเรียกสัญญาณกลุ่มนี้ว่าเป็นสัญญาณเฟสต่างกันหนึ่งในสี่ของมุมภายในวงกลม (Quadrature component)

สามารถหาขนาดและเฟสของสัญญาณข่าวสารได้ ดังสมการ 2.18 และ 2.19

$$A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \quad (2.18)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{-Q(t)}{I(t)}\right) \quad (2.19)$$

วิธีการในการแยกเอาสัญญาณที่มีองค์ประกอบเฟสเดียวกัน $I(t)$ ออกจากสัญญาณ $S(t)$ สามารถทำได้โดยการนำคลื่นพาห้ที่มีเฟสตรงกันกับ $S(t)$ มาคูณกับสัญญาณ $S(t)$ แล้วใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อแยกเอาสัญญาณเบสแบนด์ออกมา ดังแสดงในรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพบล็อกการแยกสัญญาณ $I(t)$ จากสัญญาณ $S(t)$

สามารถแสดงกระบวนการแยกสัญญาณ $I(t)$ ออกมาจากสัญญาณ $S(t)$ ในเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 2.20 ถึง 2.22

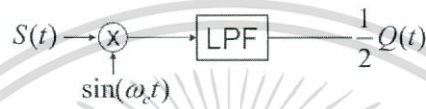
$$S(t) \cos(\omega_c t) = I(t) \cos^2(\omega_c t) + Q(t) \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t) \quad (2.20)$$

$$S(t) \cos(\omega_c t) = \frac{I(t)}{2} [1 + \cos(2\omega_c t)] + \frac{Q(t)}{2} \sin(2\omega_c t) \quad (2.21)$$

$$S(t) \cos(\omega_c t) = \frac{I(t)}{2} + \frac{I(t)}{2} \cos(2\omega_c t) + \frac{Q(t)}{2} \sin(2\omega_c t) \quad (2.22)$$

จากสมการ 2.21 จะได้ $I(t)/2$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบเบสแบนด์ ส่วน $I(t)\cos(2\omega_c t)/2$ และ $Q(t)\sin(2\omega_c t)/2$ เป็นองค์ประกอบที่มีความถี่สูง เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจึงได้สัญญาณองค์ประกอบเบสแบนด์ออกมา

ในทำนองเดียวกันในการแยกสัญญาณองค์ประกอบที่เฟสต่างกัน 90 องศา $Q(t)$ ออกมาจากสัญญาณ $S(t)$ สามารถทำได้โดยการนำคลื่นพาร์ที่มีเฟสต่างกับ $S(t)$ 90 องศา มาคูณกับสัญญาณ $S(t)$ แล้วใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อแยกเอาสัญญาณเบสแบนด์ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนภาพบล็อกการแยกสัญญาณ $Q(t)$ จากสัญญาณ $S(t)$

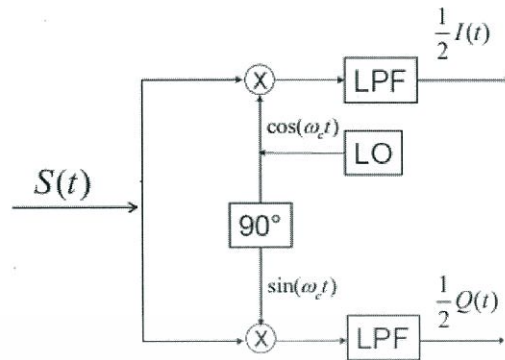
สามารถแสดงกระบวนการแยกสัญญาณ $Q(t)$ ออกมาจากสัญญาณ $S(t)$ ในเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 2.23 ถึง 2.25

$$S(t)\sin(\omega_c t) = Q(t)\sin^2(\omega_c t) + I(t)\sin(\omega_c t)\cos(\omega_c t) \quad (2.23)$$

$$S(t)\sin(\omega_c t) = \frac{Q(t)}{2}[1 - \cos(2\omega_c t)] + \frac{I(t)}{2}\sin(2\omega_c t) \quad (2.24)$$

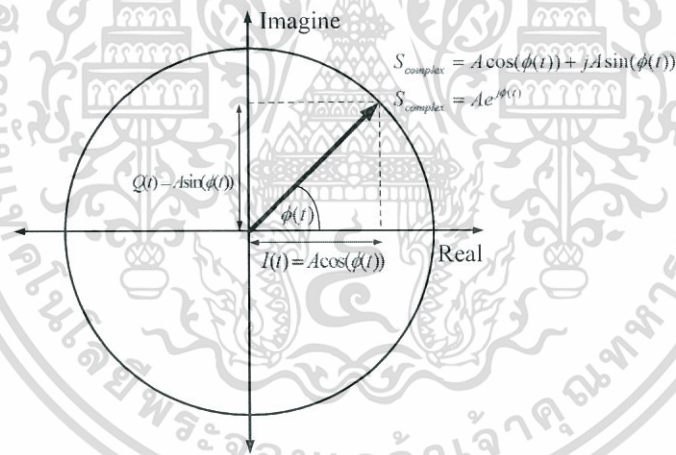
$$S(t)\sin(\omega_c t) = \frac{Q(t)}{2} - \frac{Q(t)}{2}\cos(2\omega_c t) + \frac{I(t)}{2}\sin(2\omega_c t) \quad (2.25)$$

จากสมการ 2.25 จะได้ $Q(t)/2$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบเบสแบนด์ ส่วน $-Q(t)\cos(2\omega_c t)/2$ และ $I(t)\sin(2\omega_c t)/2$ เป็นองค์ประกอบที่มีความถี่สูง เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจึงได้สัญญาณองค์ประกอบเบสแบนด์ออกมา จากวิธีการแยกสัญญาณเบสแบนด์ออกมาจากคลื่นพาร์สามารถแสดงแผนภาพบล็อกโดยรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพบล็อกในการแยกสัญญาณเบสแบนด์ออกมาจากคลื่นพาห้

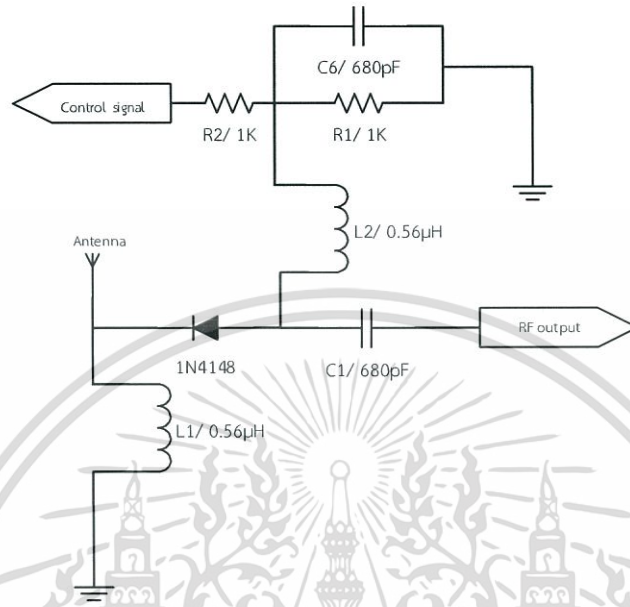
ในกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นเราจะได้สัญญาณสองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา เราจะทำให้สัญญาณอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาขนาด ความถี่ และเฟสของสัญญาณข่าวสาร การแยกองค์ประกอบทั้งสองให้เป็นจำนวนเชิงซ้อนเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย แสดงได้ในรูป 2.21



รูปที่ 2.21 องค์ประกอบ $I(t)$ และ $Q(t)$ ในรูปเชิงซ้อน

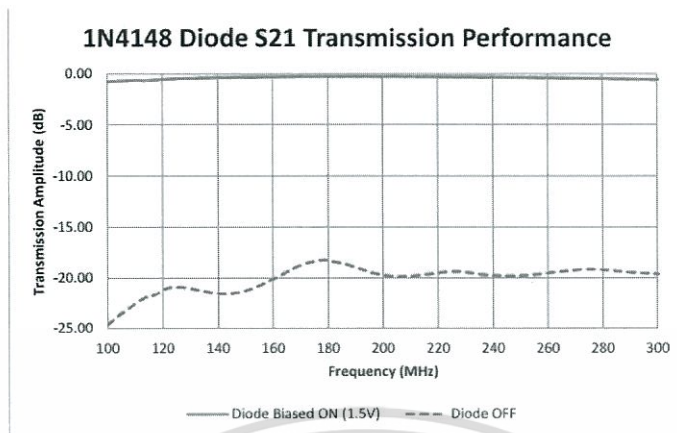
ดังนั้นกระบวนการแยกองค์ประกอบจะสามารถใช้ได้กับการตีมอดูเลตทุกรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณที่รับมาเป็นสัญญาณที่มีการมอดูเลตเชิงขนาด จะสามารถตีมอดูเลตเอาสัญญาณข้อมูลข่าวสารได้โดยใช้สมการ 2.15 มาหาขนาดของสัญญาณข่าวสาร ถ้าสัญญาณที่รับมาเป็นการมอดูเลตเชิงเฟสสามารถใช้สมการ 2.16 ในการตีมอดูเลตเอาสัญญาณข่าวสารที่อยู่ในรูปของเฟสออกมา และ ถ้าเป็นสัญญาณที่รับมาการมอดูเลตเชิงความถี่ก็จะหาเฟสออกมาโดยวิธีการเดียวกับการตีมอดูเลตเชิงเฟสก่อนแล้วจึงนำเฟสที่ได้ไปหาอนุพันธ์ก็จะได้สัญญาณข่าวสารออกมา

2.3 วงจรส่งผ่านสัญญาณวิทยุจากสายอากาศมายังเครื่องรับ



รูปที่ 2.22 วงจรส่งผ่านสัญญาณวิทยุ

วงจรส่งผ่านสัญญาณจากสายอากาศจากรูปที่ 2.22 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า L1 และ L2 มีค่า $0.56\mu\text{H}$ โดย L1 ทำหน้าที่ไบอัสกราวด์จากสัญญาณควบคุมสายอากาศ ตัวเหนี่ยวนำทั้งคู่มิค่าการลัดทอนสัญญาณ VHF ตามคุณสมบัติดังรูปที่ 2.23 สำหรับสัญญาณวิทยุที่สามารถผ่านวงจรย้อนกลับมายังช่องควบคุมวงจรถูกกำเนิดสัญญาณควบคุม จะถูกป้องกันโดยตัวเก็บประจุ C6 และตัวเก็บประจุ C1 จะเป็นตัวป้องกันไฟตรงที่ผ่านไปยังเครื่องรับวิทยุ และเมื่อวงจรนี้ได้รับอินพุตจากวงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศ ตัวต้านทาน R2 จะเป็นตัวป้องกันอันตรายจากกระแสไฟเกินจากวงจรวจรนั้น



รูปที่ 2.23 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของไดโอด 1N4148 ภายใต้การไบอัสและไม่มีกรไบอัส กระแสไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

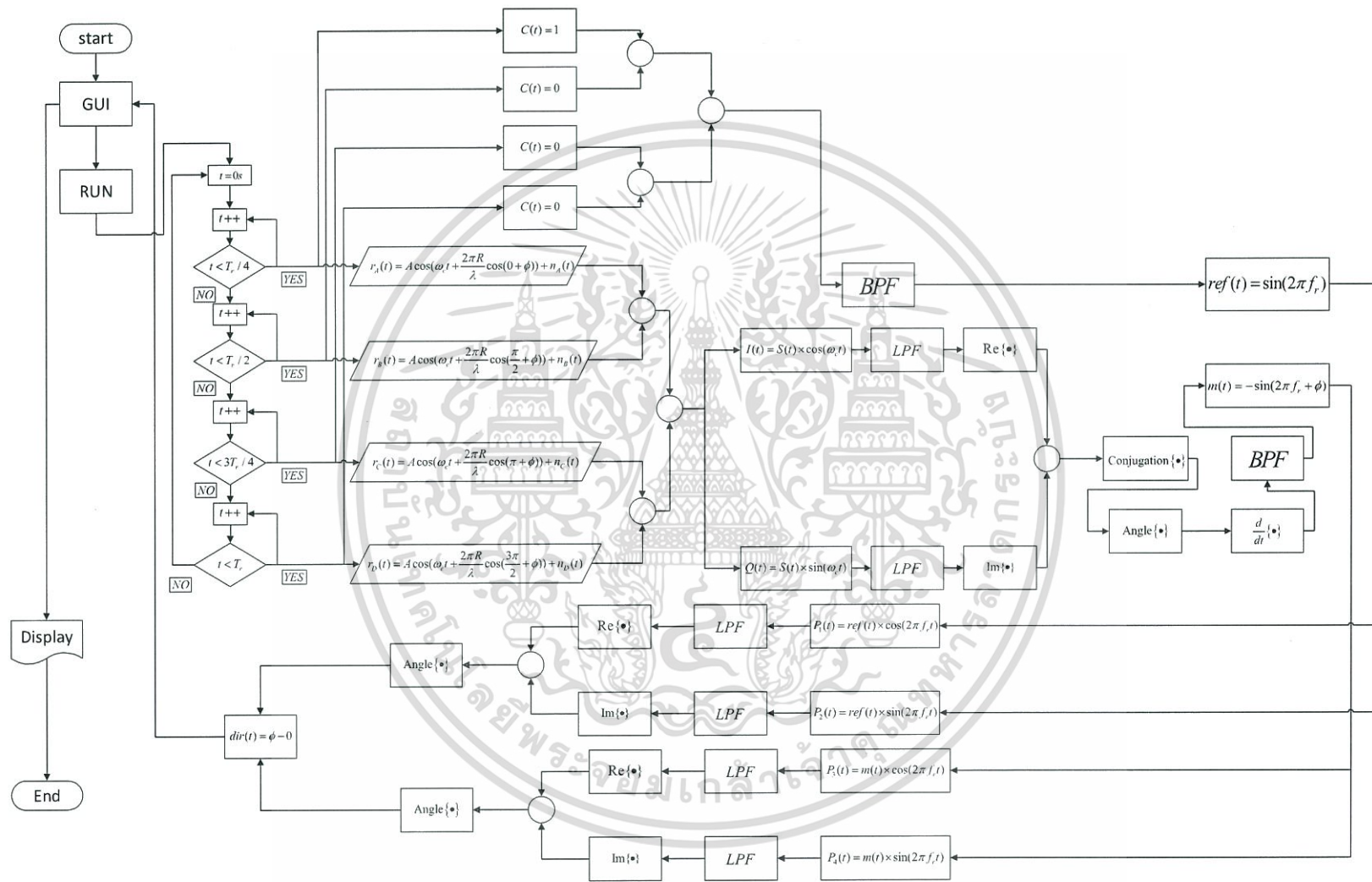
บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปฏิญญานิพนธ์

ระบบค้นหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ ที่ทำการออกแบบในปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ คือ สายอากาศอาร์เรย์ วงจรสวิตช์ควบคุมสายอากาศ วงจรควบคุมสวิตช์ เครื่องรับ RTL-SDR และคอมพิวเตอร์ประมวลผล โดยสัญญาณวิทยุจะได้รับผ่านสายอากาศ จากนั้นผ่านเข้าไปยังเครื่องรับเพื่อนำสัญญาณไปประมวลผลหาทิศทาง โดยมีแผนผังการทำงานของระบบดังรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

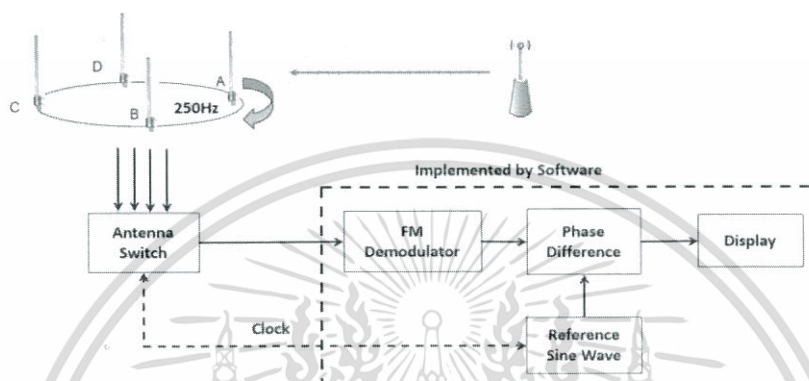


รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของระบบ

3.1 การออกแบบ

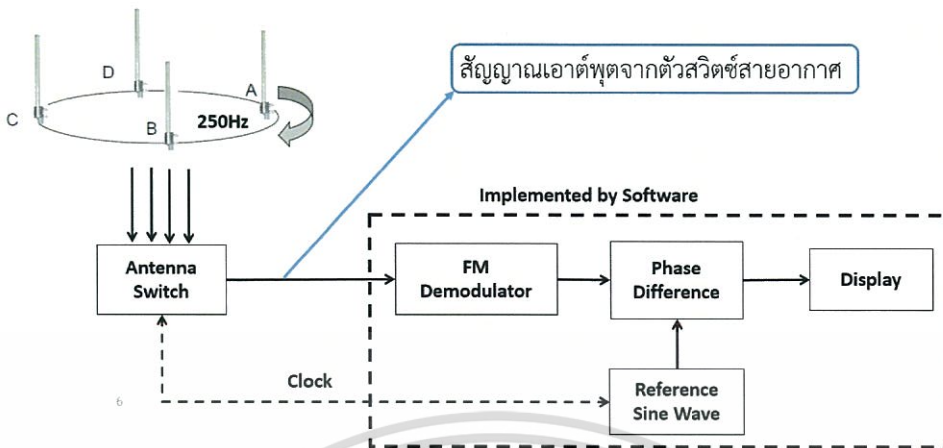
3.1.1 การออกแบบและจำลองการทำงานของระบบโดยใช้ Simulink

3.1.1.1 การจำลองสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิทช์สายอากาศ

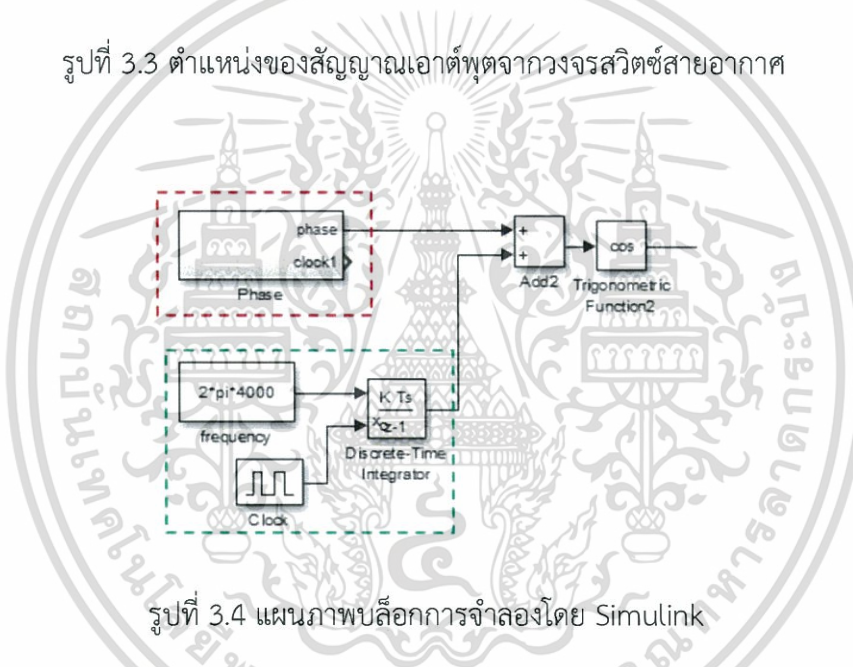


รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบ

การทำงานของระบบโดยรวมแสดงได้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งแบ่งเป็นส่วนของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ ส่วนของตัวสวิทช์สายอากาศที่จะใช้เลือกสายอากาศที่รับสัญญาณแต่ละต้น และส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ในการจำลองระบบนี้ เริ่มจากพิจารณาสัญญาณเอาต์พุตจากสายวงจรวงอากาศว่ามีรูปแบบเป็นเช่นใด ทำการตรวจสอบสเปกตรัมของสัญญาณ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่รับได้จริง จุดที่ทำการจำลองสัญญาณเพื่อให้เป็นไปตามสมการ (2.4) ในบทที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ



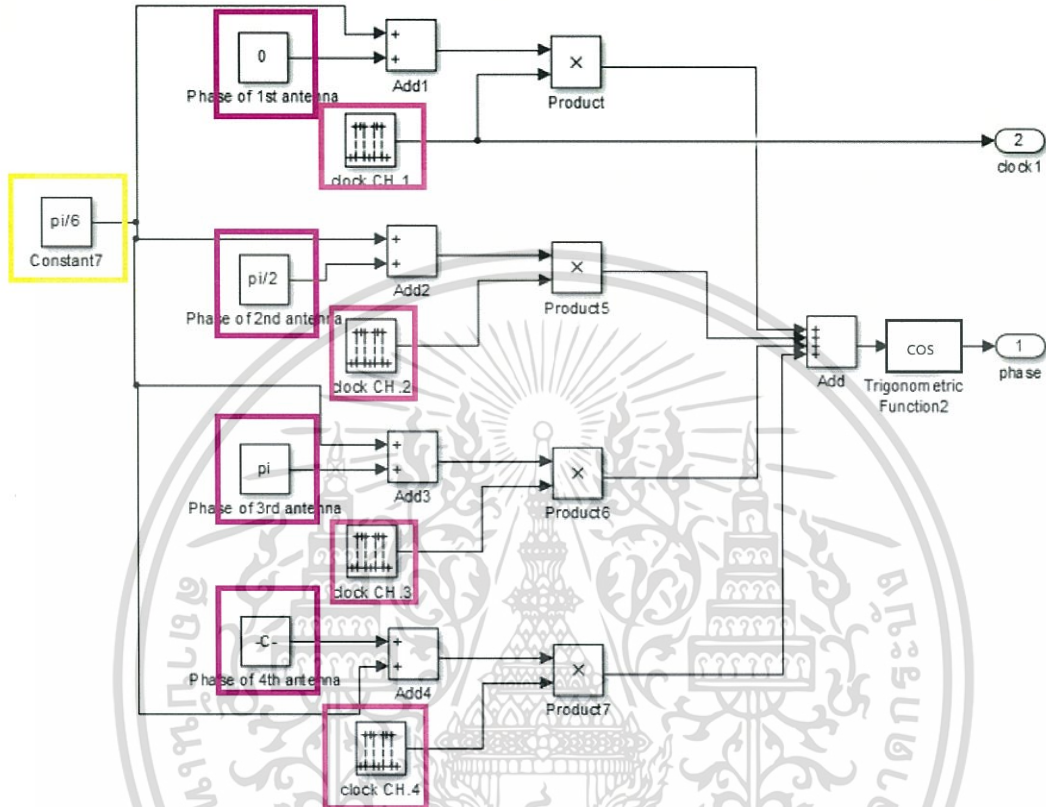
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกการจำลองโดย Simulink

ในส่วนของการจำลองระบบแสดงในรูปที่ 3.4 ในกรอบสีแดงคือเฟสของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งสร้างขึ้นตามสมการการเกิดตอบเพลอร์เทียม สมการ 3.1

$$r_i(t) = \cos\left(\omega_c t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi i}{NA} + \phi\right)\right) \tag{3.1}$$

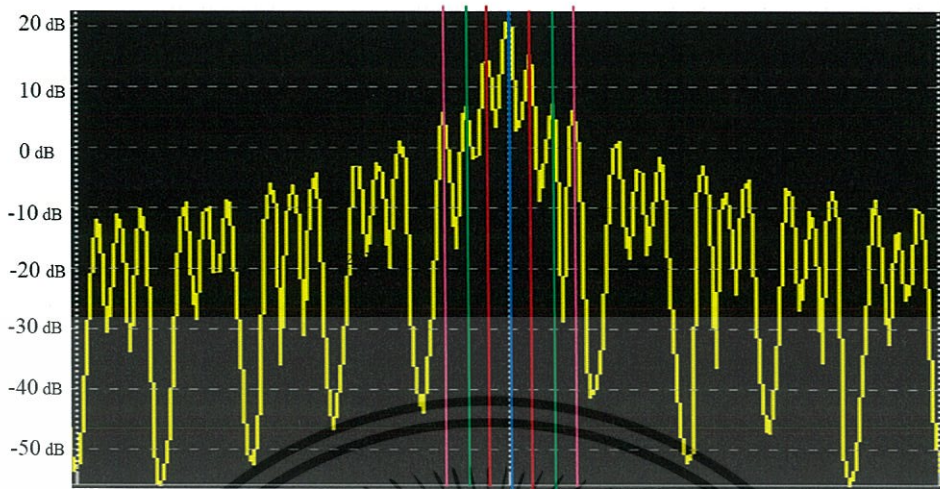
จากสมการ (3.1) มุมเฟสของสัญญาณ คือ $\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi i}{NA} + \phi\right)\right)$ ซึ่ง R คือ รัศมีการวางสายอากาศ, λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณที่รับได้, i คือ ลำดับของสายอากาศ, NA

คือ จำนวนของสายอากาศ, และ ϕ คือ มุมที่สัญญาณเข้ามา สามารถนำสมการมาเขียนเป็นแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็น แผนภาพบล็อกย่อยที่อยู่ภายในบล็อกกรอบสีแดง



รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกจำลองเฟสของสัญญาณจากสายอากาศแต่ละต้น

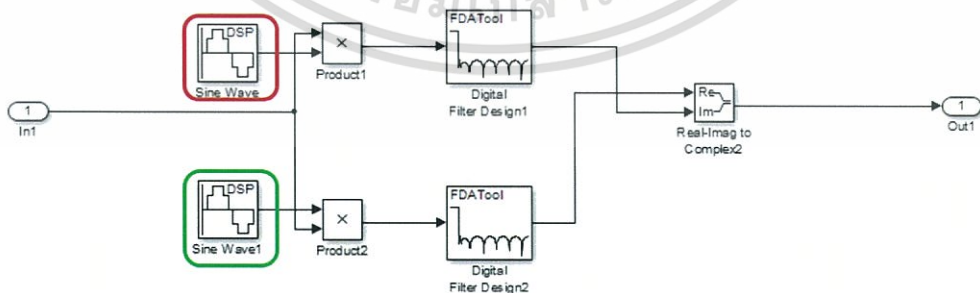
จากรูปที่ 3.5 สายอากาศจำนวน 4 ต้น ในกรอบสี่เหลี่ยมแทนสัญญาณควบคุมสายอากาศ กรอบสี่เหลี่ยมแทนเฟสของสัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้นรับได้ และสุดท้ายในกรอบสี่เหลี่ยมแทนมุมที่สัญญาณเข้ามา กรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.4 คือความถี่ของสัญญาณที่รับเข้ามา หรือก็คือค่า $\omega_c t$ ในสมการ 3.1



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศ

สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรสวิตช์สายอากาศแสดงในรูปที่ 3.6 เส้นสีน้ำเงินแสดงความถี่ศูนย์กลาง สมมติให้มีความถี่ 4000 เฮิรตซ์ และ ความถี่ในการสวิตช์สายอากาศ คือ 50 เฮิรตซ์ เส้นสีแดงแสดงฮาร์มอนิกที่ 1 ของสัญญาณ ซึ่ง มีความถี่ 4050 เฮิรตซ์ และ 3950 เฮิรตซ์ เส้นสีเขียวแสดงฮาร์มอนิกที่ 2 ซึ่งมีความถี่ 4100 เฮิรตซ์ และ 3900 เฮิรตซ์ เส้นสีชมพูแสดงฮาร์มอนิกที่ 3 ซึ่งมีความถี่ 4150 เฮิรตซ์ และ 3850 เฮิรตซ์ ส่วนฮาร์มอนิกที่ 4 ไม่มีสเปกตรัม ตำแหน่งของฮาร์มอนิกที่ 5, 6, 7 เกิดสเปกตรัม ซึ่งความถี่ของฮาร์มอนิกจะเป็นจำนวนเท่าของความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์สายอากาศ และทุกความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 4 และจำนวนเท่าของ 4 จะไม่มีสเปกตรัมเกิดขึ้น เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

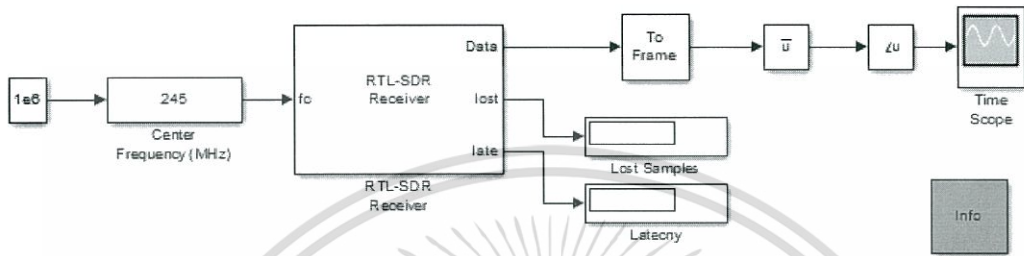
3.1.1.2 การจำลองการทำงานของเครื่องรับ RTL-SDR



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกจำลองการทำงานของ RTL-SDR

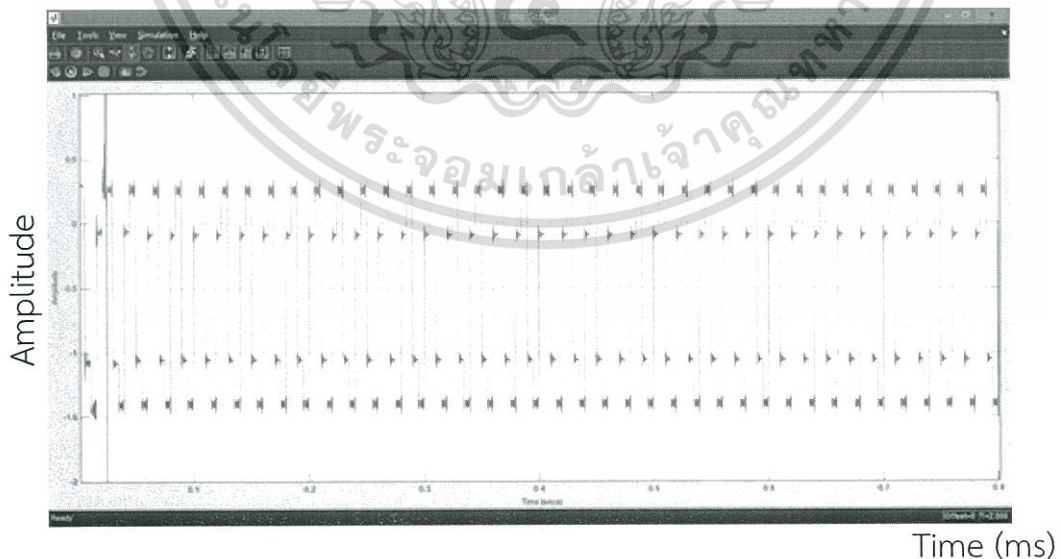
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการทำงานของ RTL-SDR ดังรูปที่ 3.7 ในกรอบสีเขียวคือ สัญญาณ cos และ ในกรอบสีน้ำตาคือ สัญญาณ sine เพื่อให้สัญญาณที่ออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อนเมื่อได้สัญญาณที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนออกมาทำให้ง่ายต่อการประมวลผลในขั้นต่อไปง่ายขึ้น ขั้นตอนการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนแสดงไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.3



รูปที่ 3.8 แผนภาพบล็อกของ RTL-SDR ที่ใช้รับสัญญาณจริง

แผนภาพบล็อกของ RTL-SDR ในภาพที่ 3.8 เป็นบล็อกที่เชื่อมระหว่างอุปกรณ์ RTL-SDR กับ Simulink เพื่อนำสัญญาณเข้ามาประมวลผลต่อใน Simulink ผลการจำลอง เมื่อลองปรับค่าของมุมที่สัญญาณเข้ามาเป็นมุม 60 องศา วัดค่ามมเฟสของสัญญาณ สัญญาณที่ได้มีเฟสไม่ตรงกันซึ่งเป็นผลจากสายอากาศแต่ละต้นรับสัญญาณที่เฟสต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งเฟสของสัญญาณที่รับได้ จะซ้ำกันเป็นคาบที่มีความถี่เท่ากับ ความถี่ที่ใช้สวิตช์สายอากาศ ในการจำลอง สมมติให้มีความถี่เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.9 เฟสของสัญญาณที่ได้จากการจำลองใน Simulink

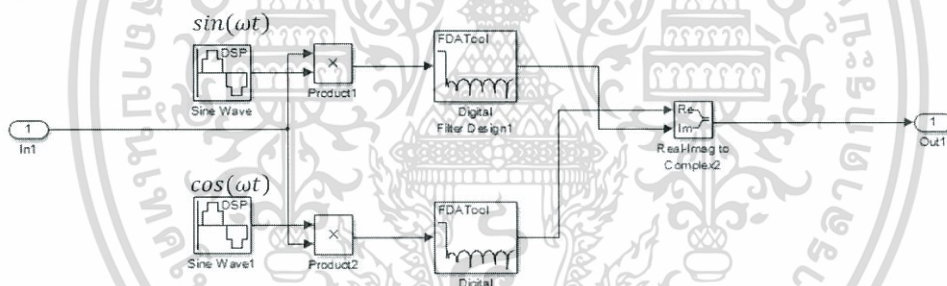
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การเปรียบเทียบเฟส

ส่วนของวงจรเปรียบเทียบเฟสระหว่างสองสัญญาณเพื่อให้สามารถคำนวณได้ต่อเนื่องแบบเวลาจริง (Real time) จึงได้มีการออกแบบเพื่อสร้าง ซึ่งความต้องการคือ ไม่ต้องคำนึงถึงแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณทั้งสองและสามารถคำนวณความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองออกมาได้ตั้งแต่แอมป์แรกๆที่เข้ามาโดยไม่ต้องรอให้ครบ 1 คาบ

หลักการที่ใช้ในการออกแบบให้สามารถคำนวณความต่างเฟสของสองสัญญาณได้ต้องอาศัยการแปลงให้สัญญาณเป็นจำนวนเชิงซ้อนก่อนแล้วจึงนำจำนวนเชิงซ้อนไปคำนวณหาเฟสต่อไป ซึ่งวิธีนี้ในทางปฏิบัติสามารถทำได้ง่าย โดยอาศัยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ตัวอย่างวิธีแปลงสัญญาณให้เป็นจำนวนเชิงซ้อนมีดังนี้ สมมติให้สัญญาณที่ต้องการแปลงคือ $\sin(\omega t + \theta_1)$ ต้องการเปรียบเทียบเฟสกับสัญญาณ $\sin(\omega t + \theta_2)$ นำสัญญาณ $\sin(\omega t + \theta_1)$ คูณกับสัญญาณ $\cos(\omega t)$ และ $\sin(\omega t)$ แล้วผ่านฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาสัญญาณความถี่สูงออกไปแล้ว เมื่อคูณกับ $\cos(\omega t)$ ให้เป็นส่วนจริง และ เมื่อคูณกับ $\sin(\omega t)$ ให้เป็นส่วนจินตภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพบล็อกการแปลงสัญญาณให้เป็นจำนวนเชิงซ้อน

สามารถแสดงการคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ส่วนจริง

$$\text{Re}(t) = \sin(\omega t + \theta_1) \times \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

$$\text{Re}(t) = (\sin(\omega t) \cos(\theta_1) + \cos(\omega t) \sin(\theta_1)) \times \cos(\omega t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\operatorname{Re}(t) = (\sin(\omega t) \cos(\omega t) \cos(\theta_1) + \cos^2(\omega t) \sin(\theta_1))$$

$$\operatorname{Re}(t) = (\sin(\omega t) \cos(\omega t) \cos(\theta_1) + \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos(2\omega t)}{2}\right) \sin(\theta_1))$$

$$\operatorname{Re}(t) = \frac{\sin(\theta_1)}{2} + \frac{\cos(2\omega t) \sin(\theta_1)}{2} + \sin(\omega t) \cos(\omega t) \cos(\theta_1)$$

เมื่อตัดองค์ประกอบที่มีความถี่สูงออกไปจะได้

$$\operatorname{Re}(t) = \frac{\sin(\theta_1)}{2} \quad (3.3)$$

ส่วนจินตภาพ

$$\operatorname{Im}(t) = \sin(\omega t + \theta_1) \times \sin(\omega t)$$

$$\operatorname{Im}(t) = (\sin(\omega t) \cos(\theta_1) + \cos(\omega t) \sin(\theta_1)) \times \sin(\omega t)$$

$$\operatorname{Im}(t) = \sin^2(\omega t) \cos(\theta_1) + \cos(\omega t) \sin(\omega t) \sin(\theta_1)$$

$$\operatorname{Im}(t) = \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2}\right) \cos(\theta_1) + \cos(\omega t) \sin(\omega t) \sin(\theta_1)$$

$$\operatorname{Im}(t) = \frac{\cos(\theta_1)}{2} - \frac{\cos(2\omega t) \cos(\theta_1)}{2} + \cos(\omega t) \sin(\omega t) \sin(\theta_1)$$

เมื่อตัดสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่สูงออกไปจะได้

$$\operatorname{Im}(t) = \frac{\cos(\theta_1)}{2} \quad (3.4)$$

ดังนั้น จะได้สัญญาณ

$$\text{Complex} = \frac{\sin(\theta_1)}{2} + j \frac{\cos(\theta_1)}{2} \quad (3.5)$$

หาเฟสของสัญญาณ

$$\text{Angle} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1)} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Angle1} = 90 - \theta_1$$

การคำนวณมุมเฟสของ $\sin(\omega t + \theta_2)$ ก็ทำนองเดียวกันจะได้

$$\text{Angle2} = 90 - \theta_2 \quad (3.7)$$

ดังนั้น ความต่างเฟสของสองสัญญาณคือ

$$\text{Phase} = \text{Angle1} - \text{Angle2} = 90 - \theta_1 - (90 - \theta_2) \quad (3.8)$$

$$\text{Phase} = \theta_2 - \theta_1$$

การหาค่ามุมเฟสที่ได้จากการคำนวณจะนำไปใช้แสดงผลในขั้นสุดท้ายเพื่อระบุทิศทางของเครื่องส่ง

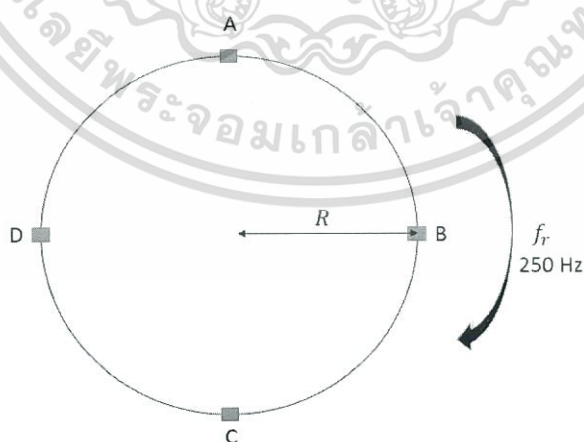
3.1.2 สายอากาศและการออกแบบตำแหน่งในการวาง

สายอากาศโมโนโพล คือ สายอากาศที่มีความยาวของตัวสายอากาศเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล สามารถรับสัญญาณได้เท่ากันทุกทิศทางในมุมกวาด (Azimuth) สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สายอากาศโมโนโพล

การออกแบบตำแหน่งการวางสายอากาศเพื่อให้เกิดการเบี่ยงเบนความถี่จากความถี่ศูนย์กลาง การออกแบบคือ วางสายอากาศรอบวงกลมโดยใช้สายอากาศ ตามรูปที่ 3.11 จำนวน 4 ต้นวางที่ตำแหน่งต่างๆ รอบวงกลม ดังรูปที่ 3.12 รัศมีของตำแหน่งการวางมีผลต่อความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด ซึ่งการออกแบบตำแหน่งการวางสายอากาศ จะต้องเลือกรัศมีการวางที่เหมาะสม ความต้องการคือ ให้มีการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (dF) เท่ากับ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีการวางสายอากาศ (R) กับการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (dF) สามารถได้จากสมการ 2.1 ในบทที่ 2 โดยกำหนดให้ค่าอื่นๆ เป็นค่าคงที่ ได้แก่ $\lambda = c/f_r = 3 \times 10^8 / 245 \times 10^6$ เมตร และ f_r เท่ากับ 250 เฮิร์ตซ์ เมื่อเปลี่ยนค่า R ตั้งแต่ 0.1 เมตร ถึง 1.0 เมตร ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวางสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีการวางสายอากาศและความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด

รัศมีของวงกลม (R)	ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (dF)
0.1 เมตร	128.2 เฮิรตซ์
0.2 เมตร	256.4 เฮิรตซ์
0.3 เมตร	384.6 เฮิรตซ์
0.4 เมตร	512.9 เฮิรตซ์
0.5 เมตร	641.1 เฮิรตซ์
0.6 เมตร	769.3 เฮิรตซ์
0.7 เมตร	897.5 เฮิรตซ์
0.8 เมตร	1025.7 เฮิรตซ์
0.9 เมตร	1153.9 เฮิรตซ์
1.0 เมตร	1282.2 เฮิรตซ์

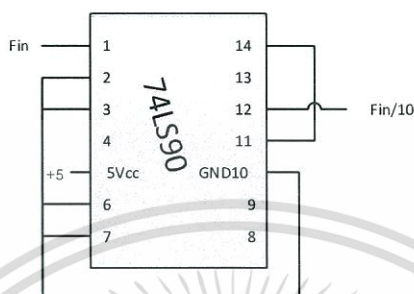
จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าค่ารัศมีที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดไปประมาณ 1 กิโลเฮิรตซ์ คือ ค่ารัศมีการวางสายอากาศ (R) 0.8 เมตร ดังนั้น จึงเลือกตำแหน่งการวางสายอากาศที่รัศมี 0.8 เมตร

3.1.3 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมสายอากาศ

รูปที่ 3.13 คริสตัลอสซิลเลเตอร์

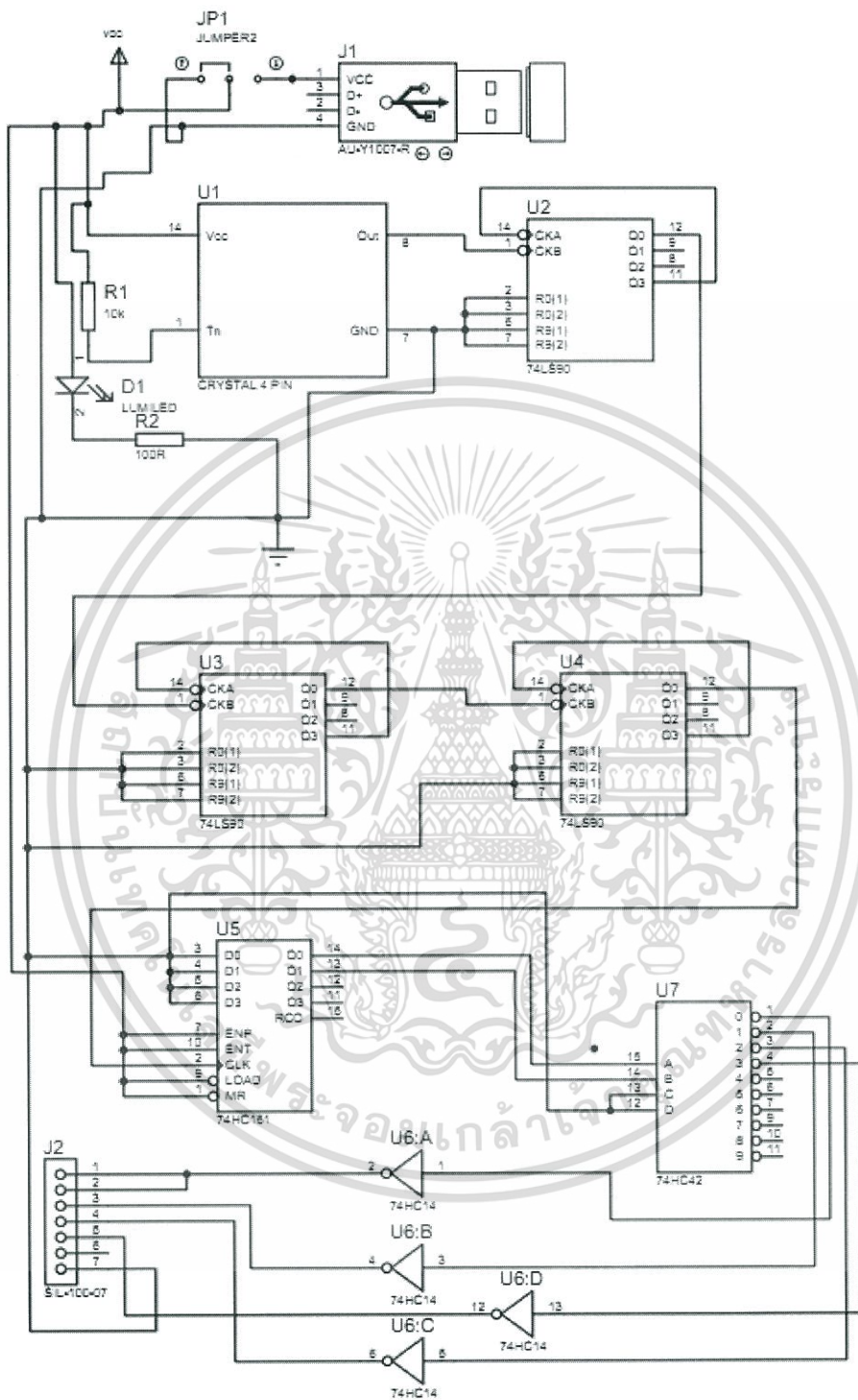
การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมสายอากาศนี้จะใช้คริสตัลอสซิลเลเตอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ดังรูปที่ 3.13 การนำสัญญาณนาฬิกานี้มาใช้

เป็นสัญญาณควบคุมสายอากาศ จำเป็นต้องลดความถี่ลงให้เหลือ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงนำสัญญาณ 1 เมกะเฮิร์ตซ์มาผ่านไอซี 74LS90 ดังรูป 3.14 ที่เป็นตัวหารสัญญาณนาฬิกาโดยตั้งไว้ 10 เท่านำมาต่ออนุกรมกัน 3 ตัวจึงจะได้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ที่ต้องการ



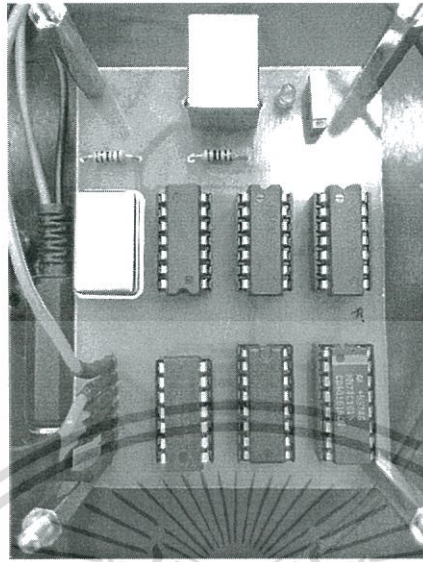
รูปที่ 3.14 ไอซี 7490 ที่ใช้หารสัญญาณนาฬิกา 10 เท่า

เมื่อได้ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ตามที่ต้องการแล้ว จึงนำสัญญาณนี้ผ่านวงจรเข้ารหัสเพื่อสร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสายอากาศทั้ง 4 ต้นดังรูปที่ 3.15 โดยควบคุมสายอากาศสลับกัน คล้ายการหมุนเป็นวงกลมโดย U1 คือคริสตัลลออสซิลเลเตอร์ U2 U3 และ U4 เป็นไอซีหารความถี่ (74LS90) โดยที่เอาต์พุตของไอซี U4 จะมีความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ให้ไอซี U5 (74HC161) เป็นตัวเข้ารหัสไบนารี 2 บิต สัญญาณไบนารีนี้จะถูกถอดรหัสด้วยไอซี U7 (74HC42) เป็นสัญญาณควบคุมสายอากาศทั้ง 4 ต้น แต่สัญญาณที่ออกมาจากไอซี U7 จะให้สัญญาณเป็นลอจิก 0 เมื่อตรงกับช่องสัญญาณสายอากาศที่เลือก ไอซี U6 (74HC14) จึงถูกเลือกขึ้นมาเป็นตัวกลับลอจิกเหล่านั้น โดยรูปที่ 3.16 จะแสดงถึงวงจรที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์แล้ว และพร้อมนำไปใช้งานได้จริง



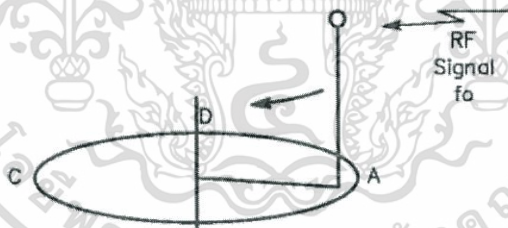
รูปที่ 3.15 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศที่ใช้งานจริงจากที่ออกแบบไว้

3.1.4 อุปกรณ์ตัดต่อสัญญาณจากสายอากาศ

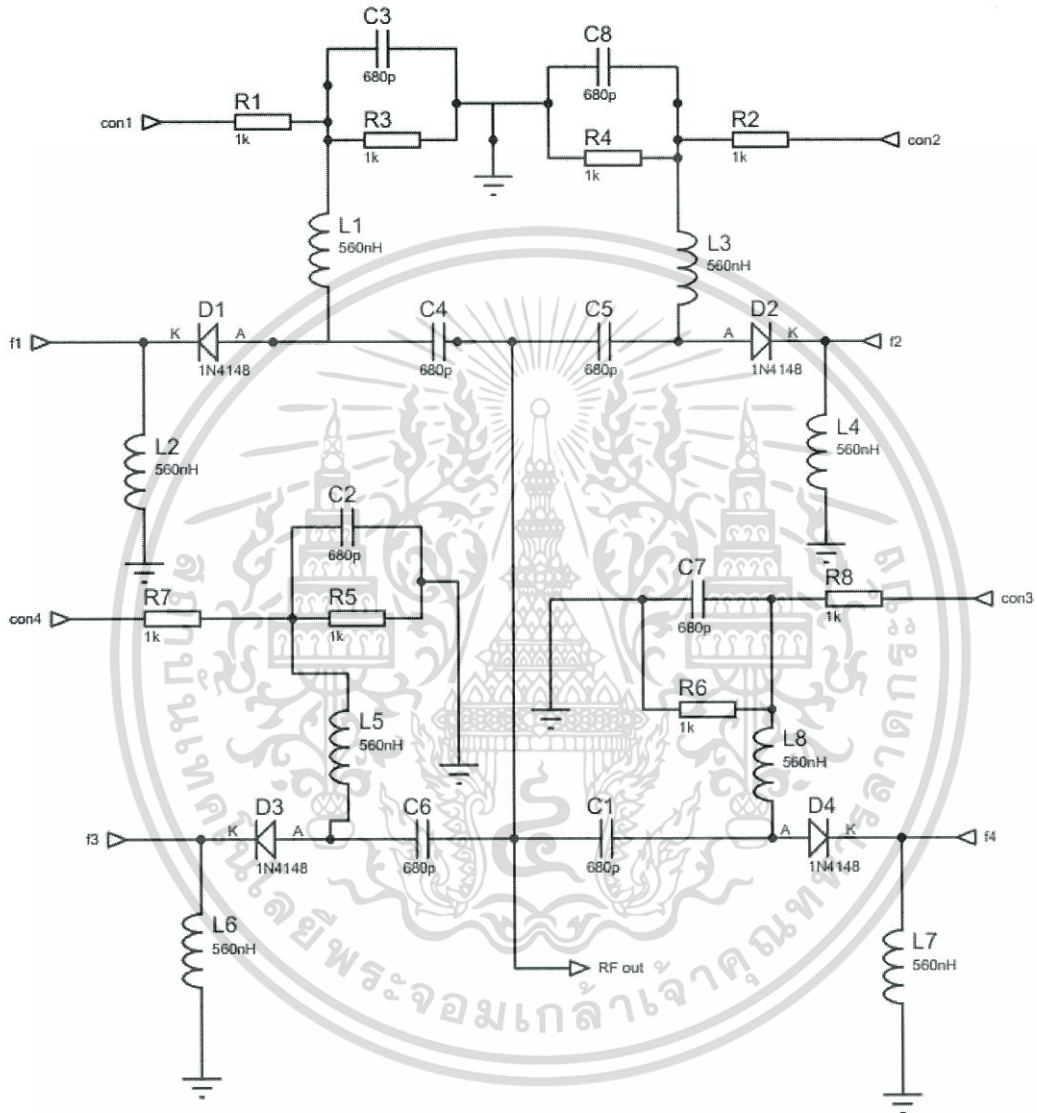


รูปที่ 3.17 การจำลองการหมุนสายอากาศด้วยวงจรตัดต่อสัญญาณ

เพื่อจำลองการหมุนสายอากาศรอบจุดอ้างอิงดังรูป 3.17 ผู้จัดทำได้ออกแบบวงจรที่ใช้ในการตัดต่อการส่งผ่านสัญญาณจากสายอากาศ โดยใช้สัญญาณควบคุมจากวงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศที่ออกแบบไว้ โดยวงจรที่ใช้ จะต่อตามรูปที่ 3.18 เป็นวงจรจริงและต่อใช้งานกับ

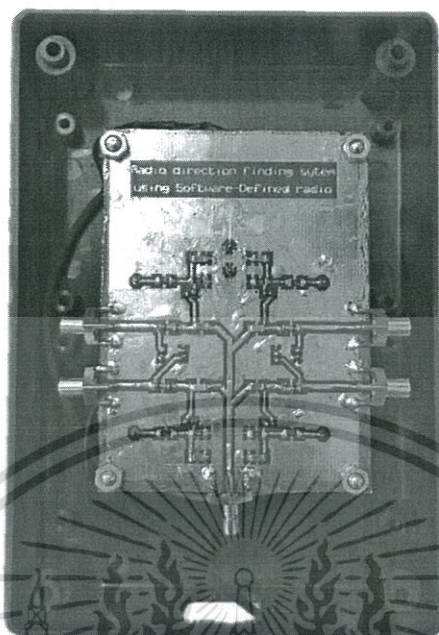
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศ ดังรูปที่ 3.19 และนำวงจรทั้งหมดมาบรรจุลงในกล่องเพื่อนำไปใช้งานจริงดังรูปที่ 3.20

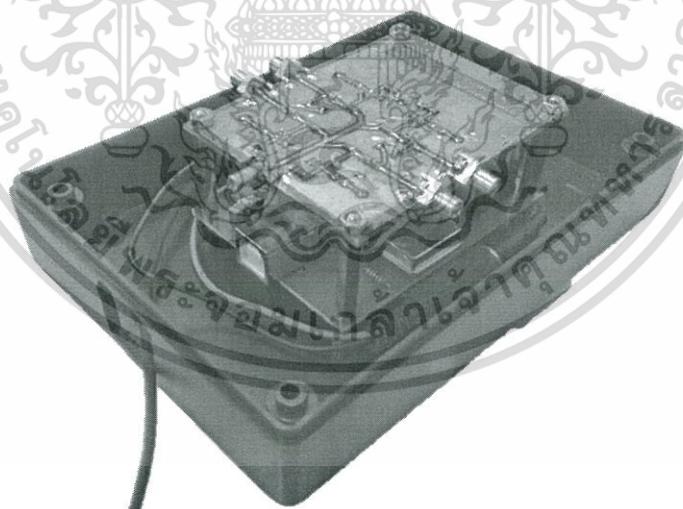


รูปที่ 3.18 วงจรควบคุมสายอากาศ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมสายอากาศที่ออกแบบเพื่อใช้งานจริงจากที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.20 วงจรควบคุมสายอากาศที่ออกแบบเพื่อใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 RTL-SDR 2832U

ในสองส่วนแรกทีกล่าวมาข้างต้นเป็นการนำสัญญาณวิทยุมาผ่านวงจรเพื่อให้เกิดเป็นคอปเพลอร์เทียม การนำสัญญาณมาตีมอดูเลตเพื่อนำสัญญาณไซน์ที่เกิดจากคอปเพลอร์เทียมมาใช้เพื่อหาทิศทางของสัญญาณวิทยุที่รับมานั้นจะใช้เครื่องรับวิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (RTL-SDR)

สำหรับการโปรแกรมจัดการเครื่องรับวิทยุนี้จะใช้โปรแกรมแมทแล็บเป็นตัวจัดการทั้งหมด ทั้งในส่วนการตั้งค่าความถี่ การนำสัญญาณมาตีมอดูเลต และการนำเข้าสู่สัญญาณควบคุมสายอากาศมาประมวลผลร่วมกับเครื่องรับ เพื่อสุดท้ายจะได้ตำแหน่งทิศทางออกมา

การต่อเครื่องรับวิทยุนี้จะรับสัญญาณจากวงจรควบคุมสายอากาศดังรูปที่ 3.21

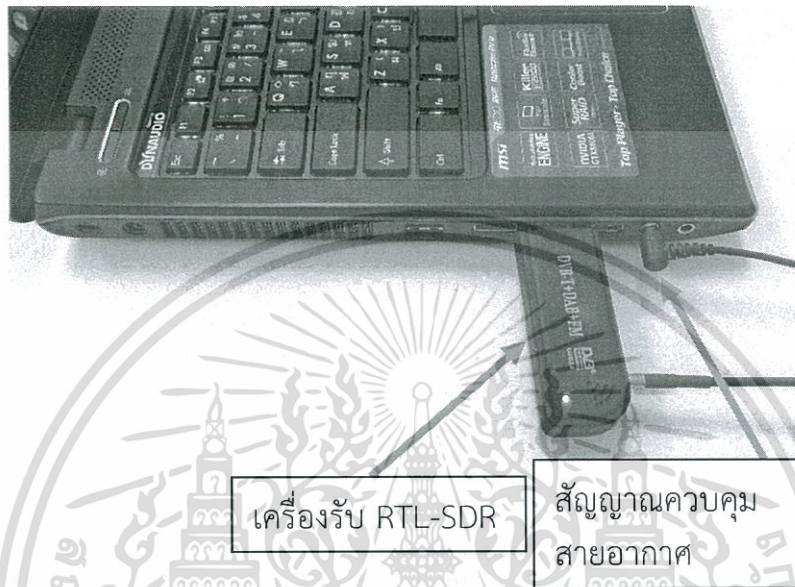


รูปที่ 3.21 เครื่องรับวิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์รับสัญญาณวิทยุจากวงจรควบคุมสายอากาศ

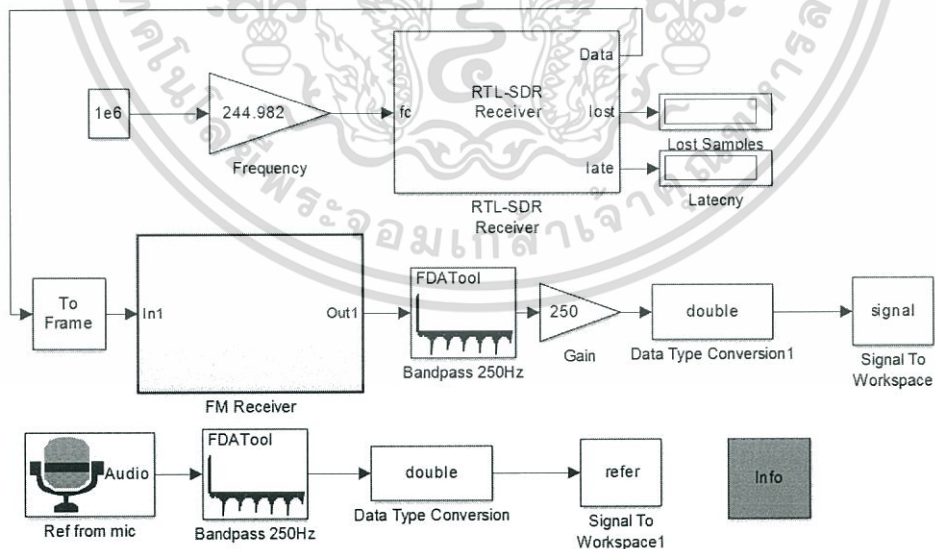
3.1.6 การนำอุปกรณ์ทั้งหมดมาเชื่อมต่อกัน และการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

ในการหาทิศทางของเครื่องส่งวิทยุ จะใช้วิธีการเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างสัญญาณควบคุมสายอากาศ และสัญญาณที่ถูกตีมอดูเลตจากเครื่องรับวิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ โดยจะนำสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1 มาต่อเข้ากับช่องรับไมโครโฟนของคอมพิวเตอร์

การเชื่อมต่อทั้งหมดทั้งจากสัญญาณควบคุมสายอากาศ การเชื่อมต่อไปยังบอร์ดประมวลผล และเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์จะแสดงดังรูปที่ 3.22 และการโปรแกรมแมทแล็บเพื่อหาทิศทางของเครื่องรับดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์เพื่อให้โปรแกรมแมทแล็บทำการประมวลผล

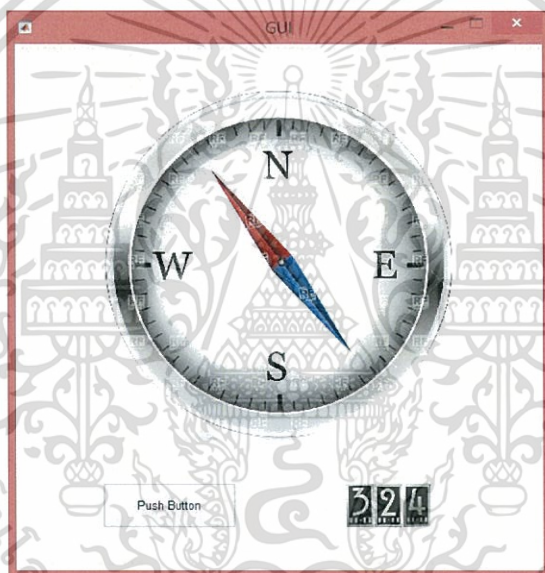


รูปที่ 3.23 แผนภาพของโปรแกรมแมทแล็บเพื่อนำสัญญาณต่างๆ มาประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.23 สัญญาณจากช่องไมโครโฟนในบล็อกชื่อ Ref from mic และสัญญาณที่ถูกตีมอดูเลตในบล็อก RTL-SDR Receiver ที่ผ่านบล็อก FM Receiver จะผ่านฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาเฉพาะความถี่ประมาณ 250 เฮิรตซ์ที่บล็อก Bandpass 250 Hz มาเก็บไว้ในตัวแปรที่โปรแกรมแมทแล็บ ด้วยบล็อก Signal to workspace สำหรับการที่จะหาทิศทางของเครื่องส่งวิทยุ นั้น ก็จะนำสัญญาณที่ถูกเก็บไว้แล้ว มาหาทิศทางโดยการเขียนโปรแกรมเปรียบเทียบความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองออกมาเป็นองศาที่สามารถเทียบได้เป็นมุมกวาดจากแกนกลางในการวางสายอากาศ

เมื่อได้ทิศทางของเครื่องส่งวิทยุแล้ว ผู้จัดทำได้รวมการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดสร้างส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ (GUI : Graphic User Interface) เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้งาน โดยจะรับคำสั่งเพื่อเริ่มต้นโปรแกรม และแสดงทิศทางที่มีรูปภาพบอกทิศทางโดยคร่าว ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ส่วนกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ กรณีมุม 324 องศา

จากรูปที่ 3.24 ที่มุมด้านล่างขวาจะแสดงทิศทางของเครื่องส่งออกมาเป็นตัวเลขที่แสดงมุมอาซิมุท โดยที่จะแสดงเป็นภาพกราฟิกรูปเข็มทิศที่ชี้ไปยังทิศทางนั้นด้วยหัวเข็มทิศสีแดง ในตัวอย่างจะเป็นมุม 324 องศา หรือทิศตะวันตกเฉียงเหนือ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในการออกแบบระบบโดยรวมจะใช้เครื่องมือที่มีทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.25 จะมีดังนี้ ฮาร์ดแวร์ที่ใช้

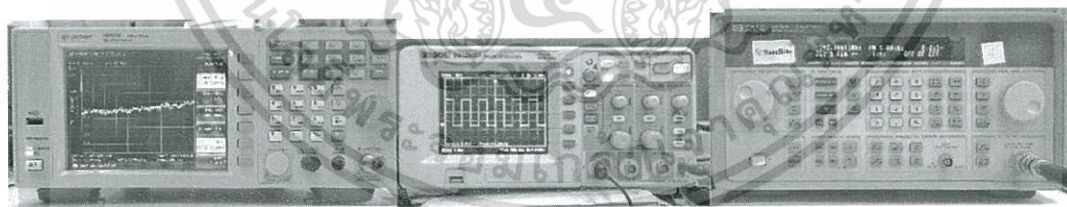
- 1) วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสายอากาศ
- 2) วงจรควบคุมสายอากาศ
- 3) เครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ RTL-SDR
- 4) คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.25 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้

เครื่องมือที่ใช้เก็บผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.26 ได้แก่

- 1) Digital Oscilloscope
- 2) Spectrum Analyzer
- 3) Signal Generator



รูปที่ 3.26 เครื่องมือที่ใช้เก็บผลการทดลอง

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

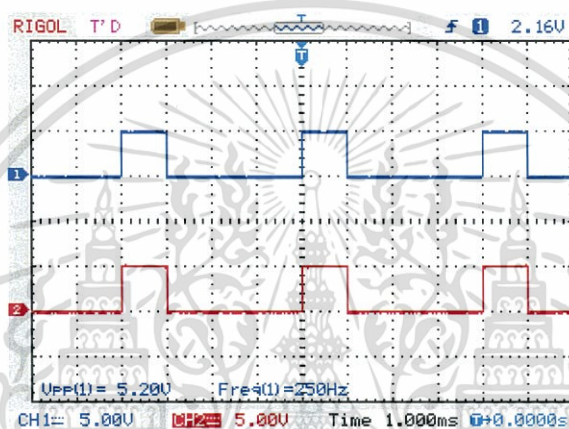
- 1) โปรแกรมแมทแล็บ
- 2) โปรแกรม Soundcard Scope
- 3) โปรแกรม SDRSharp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

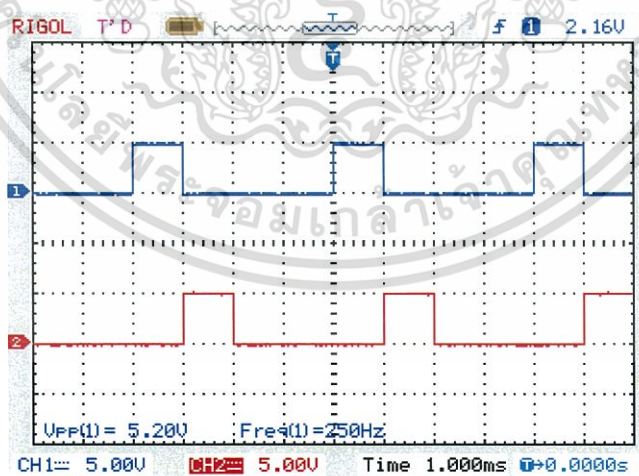
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.3.1 การจัดเก็บผลการทดลองวัดสัญญาณควบคุมสายอากาศจากวงจรควบคุมสายอากาศ

ในขั้นตอนแรกจะทำการวัดสัญญาณจากเอาต์พุตของวงจรควบคุมสายอากาศเพื่อตรวจสอบความถี่รวมถึงค่าความถี่ที่แท้จริง โดยใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณอ้างอิงเทียบกับสัญญาณทั้ง 4 ช่องสำหรับสายอากาศแต่ละต้น ดังรูปที่ 3.27 ถึง 3.30 โดยที่สัญญาณสีน้ำเงินคือสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณสีแดงคือสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องต่างๆ

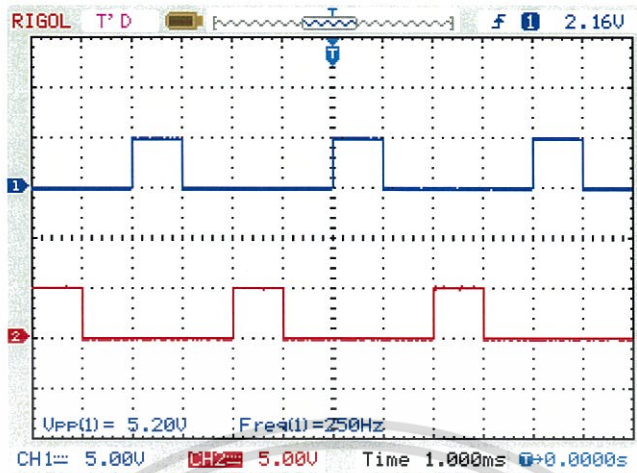


รูปที่ 3.27 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1 (สีแดง)

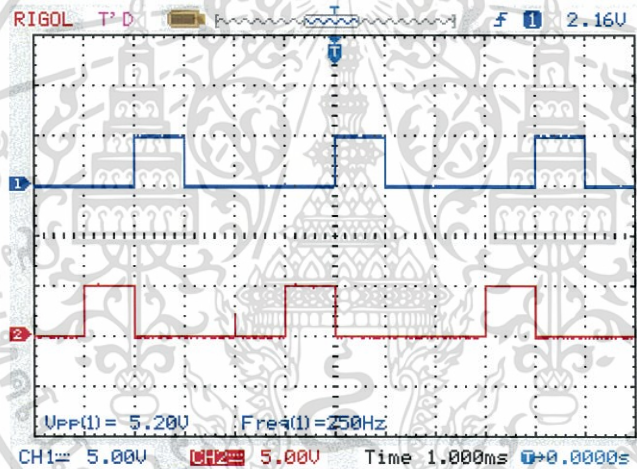


รูปที่ 3.28 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 2 (สีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 3 (สีแดง)



รูปที่ 3.30 สัญญาณอ้างอิง (สีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 4 (สีแดง)

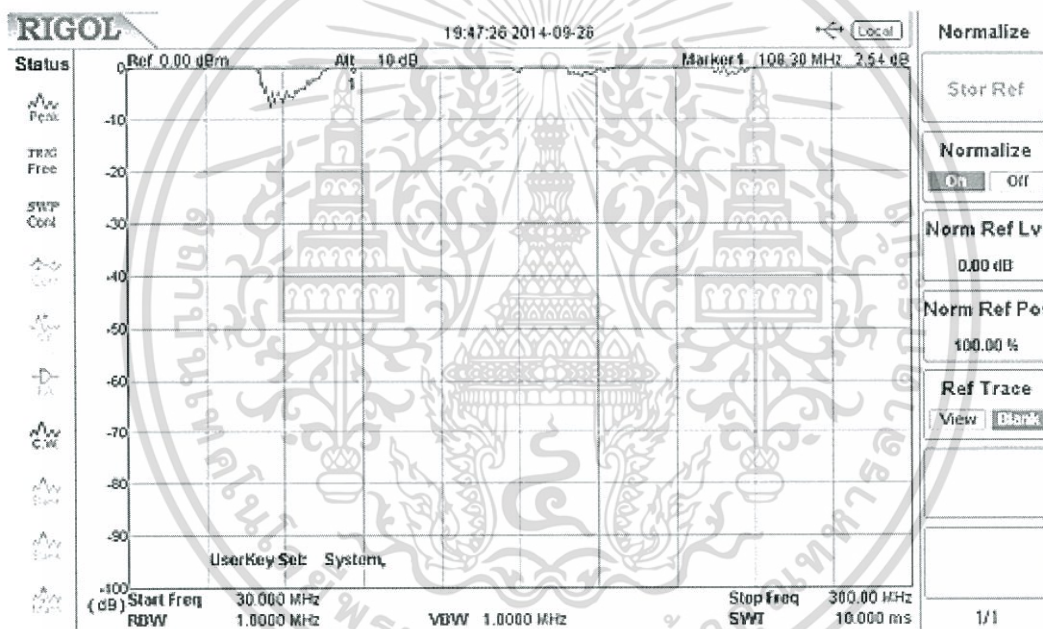
จากรูปที่ 3.27 ถึง 3.30 สัญญาณที่วงจรควบคุมสายอากาศสร้างขึ้นมีความถี่ประมาณ 250 เฮิรตซ์ และมีค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยแต่ละช่องสัญญาณจะมีการเลื่อนเฟสไปช่องละ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้คือสัญญาณที่ควบคุมการส่งผ่านสัญญาณจากสายอากาศแต่ละตำแหน่งมายังเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ ที่จะใช้โปรแกรมแมทแล็บในการหาทิศทางต่อไป

3.3.2 การทดสอบวงจรควบคุมสายอากาศเพื่อหาความถี่ที่ใช้งานได้

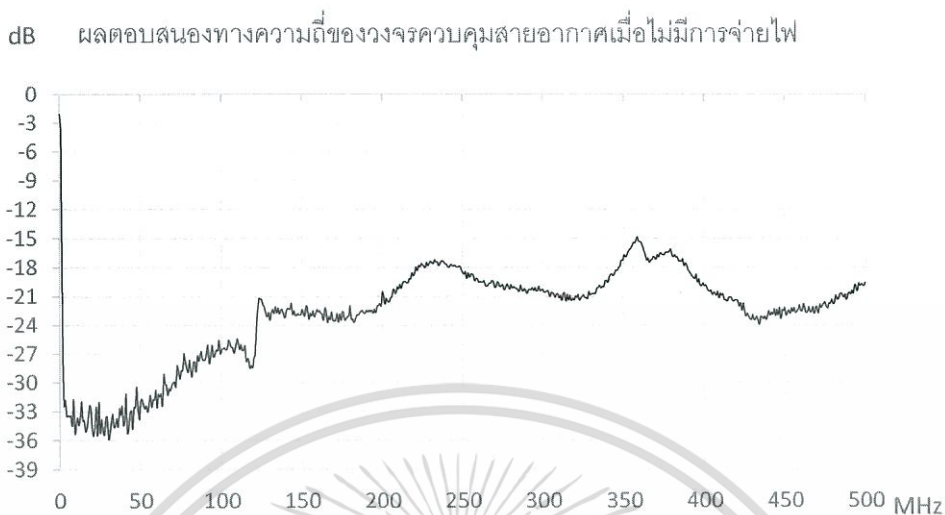
วงจรที่สร้างจะต้องนำไปทดสอบการตอบสนองทางความถี่ เพื่อหาความสามารถในการส่งผ่านสัญญาณไปยัง SDR โดยใช้ Tracking Generator ที่อยู่ใน Spectrum Analyzer

การใช้งาน Tracking Generator จำเป็นที่จะต้องนอร์มอไลซ์ค่าที่อ่านได้จากการ short circuit ทางฝั่งส่งและรับจากเครื่อง โดยเมื่อนอร์มอไลซ์ค่าแล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.31 และเมื่อเชื่อมต่อวงจรแล้วก็จะวัดผลตอบสนองทางความถี่ขณะไม่จ่ายไฟให้วงจรดังรูปที่ 3.32

การนอร์มอไลซ์ก่อนทำการทดลองเพื่อชดเชยการลดทอนทางความถี่ในขณะการต่อผ่านสายส่งที่มีคุณสมบัติการลดทอนทางความถี่ต่างๆ เมื่อชดเชยค่าแล้วก็จะได้คุณสมบัติการส่งผ่านทางความถี่ของวงจรมันๆ

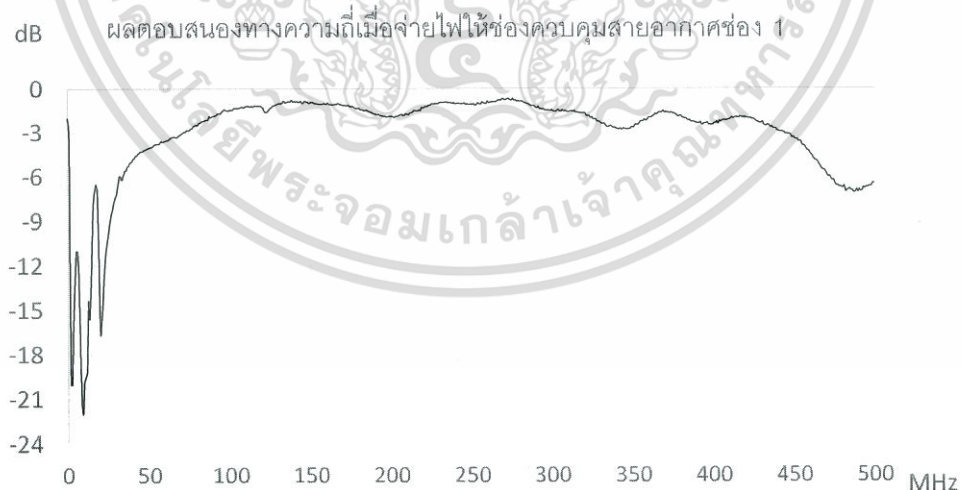


รูปที่ 3.31 การนอร์มอไลซ์ค่าก่อนที่จะใช้ทดสอบในวงจร



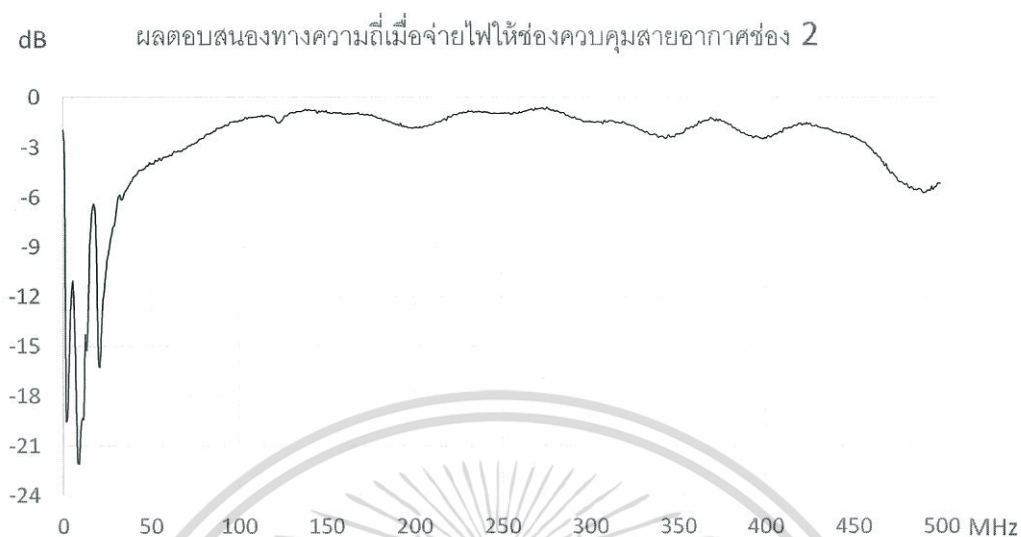
รูปที่ 3.32 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อไม่มีการจ่ายไฟให้ช่องควบคุม

เมื่อนอร์มอไลซ์ค่าต่างๆเรียบร้อยแล้วจึงนำวงจรมาทดสอบโดยรับสัญญาณจากเครื่อง Tracking Generator มายังอินพุตแต่ละช่องสัญญาณและนำเอาต์พุตของวงจรต่อไปยังภาครับของ Tracking Generator โดยผลการทดสอบที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.33 ถึง 3.36



รูปที่ 3.33 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 1 ในวงจรควบคุมสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

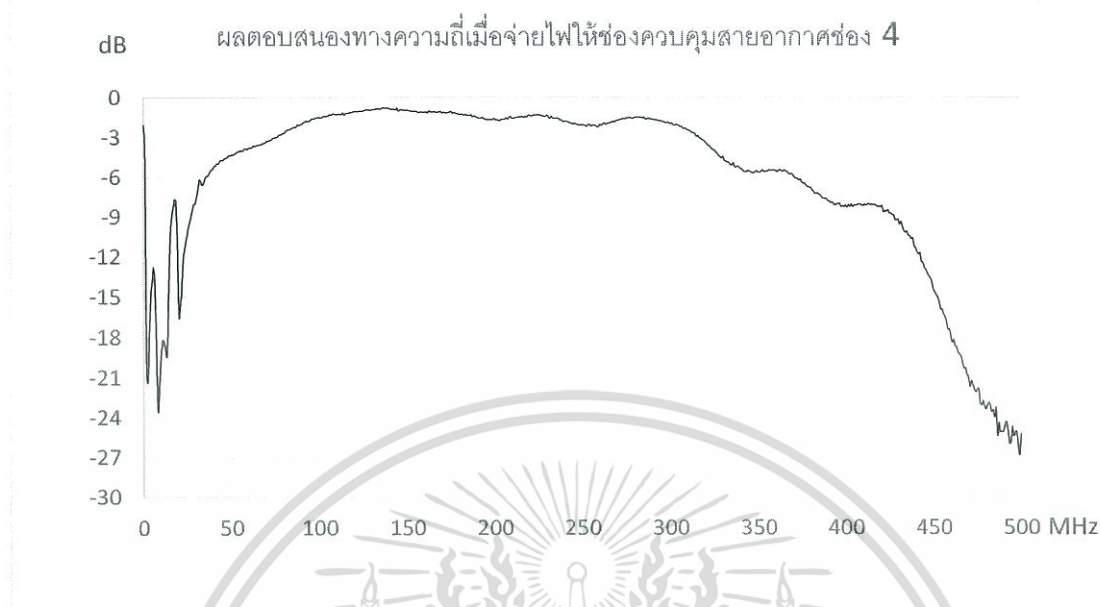


รูปที่ 3.34 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 2 ในวงจรควบคุมสายอากาศ



รูปที่ 3.35 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 3 ในวงจรควบคุมสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



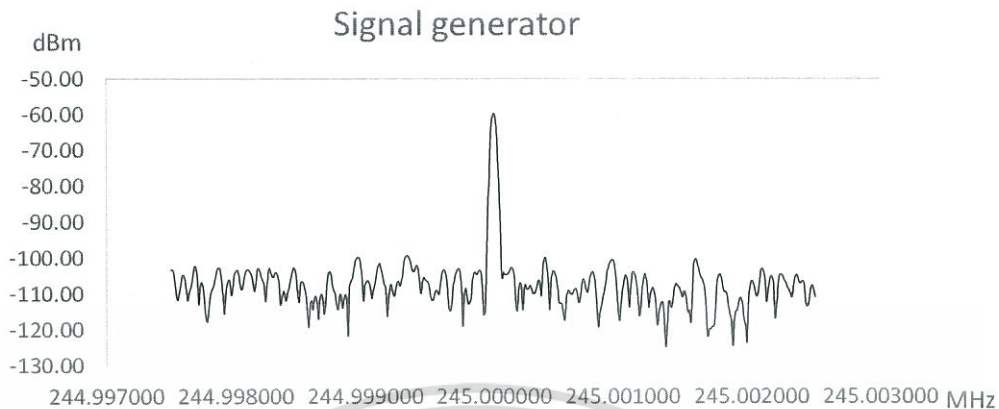
รูปที่ 3.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ 4 ในวงจรควบคุมสายอากาศ

จากรูปที่ 3.33 ถึง 3.36 จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถส่งผ่านความถี่ได้เป็นอย่างดีในช่วง 75 – 325 เมกะเฮิรตซ์ แต่ในความถี่ตั้งแต่ 325 เมกะเฮิรตซ์ถึง 450 เมกะเฮิรตซ์ สัญญาณจากช่องที่ 3 และ 4 จะมีค่าการลดทอนที่สูง ดังรูปที่ 3.35 และ 3.36 โดยจะแตกต่างกับสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 3.33 และ 3.34 ที่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ เนื่องจากเทคนิคในการบัดกรีอุปกรณ์ในวงจรอาจจะส่งผลให้เกิดการลดทอนดังกล่าว ดังนั้นจะไม่สามารถนำวงจรนี้ไปใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 325 เมกะเฮิรตซ์ได้

3.3.3 สัญญาณวิทยุที่รับมาได้หลังจากผ่านวงจรควบคุมสายอากาศ

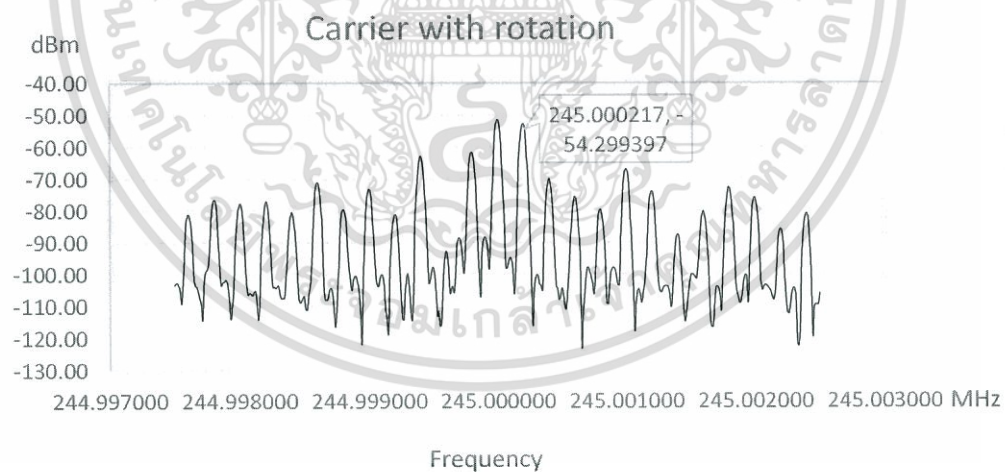
วงจรควบคุมสายอากาศที่ออกแบบ จะรับสัญญาณวิทยุเข้ามาผ่านสายอากาศ 4 ต้นที่วางอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางห่างด้วยรัศมีเดียวกัน วงจรจะสลับการรับสัญญาณวิทยุเหมือนกับการหมุนสายอากาศรอบจุดศูนย์กลางนั้น สัญญาณที่ผ่านวงจรถูกส่งมาแล้วจะเป็นการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการวัดสัญญาณที่ออกมาจากวงจรนี้

ในส่วนแรกจะเป็นการวัดสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องส่งดังรูปที่ 3.37 โดยจะใช้เครื่องส่งเป็น Signal Generator ที่ปล่อยความถี่ 245 เมกะเฮิรตซ์ที่ไม่มีการมอดูเลต



รูปที่ 3.37 สเปกตรัมของสัญญาณที่สร้างโดยเครื่อง Signal Generator

ต่อมาจึงนำวงจรควบคุมสายอากาศมารับสัญญาณที่ออกมาจากเครื่อง Signal Generator และวัดสัญญาณด้วย Spectrum Analyzer ดังรูปที่ 3.38



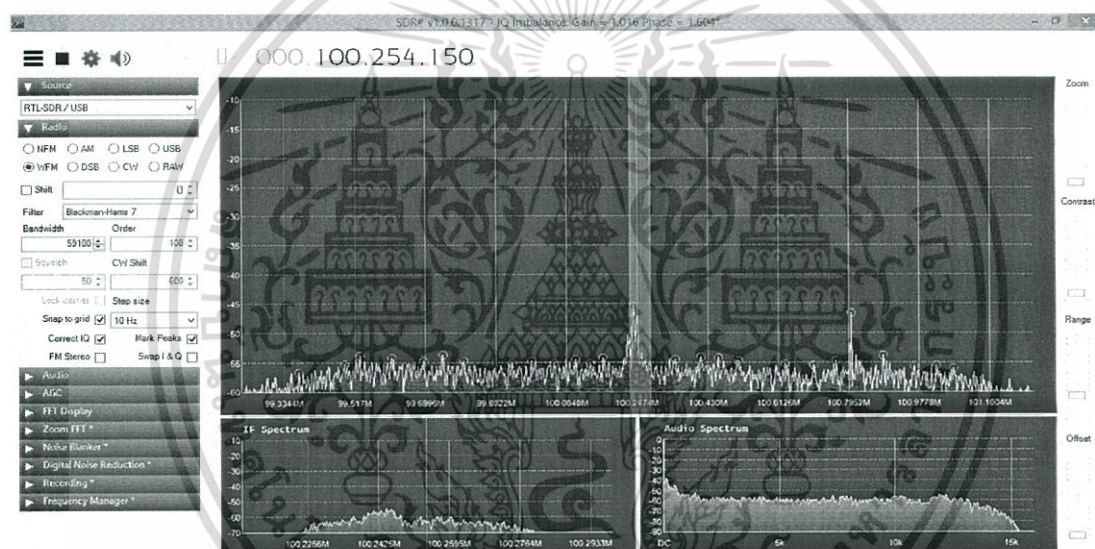
รูปที่ 3.38 สเปกตรัมของสัญญาณที่รับและผ่านวงจรควบคุมสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเอาต์พุตจากวงจรควบคุมสายอากาศเมื่อมีอินพุตเข้าเป็นสัญญาณความถี่เดียว จะถูกมอดูเลตเป็นแบบเอฟเอ็ม โดยจากรูปจะเห็นว่าสัญญาณฮาร์โมนิกแรกจะตรงกับความเร็วที่ใช้ในการหมุนสายอากาศ ดังนั้นการหาทิศทางของเครื่องส่งสัญญาณวิทยุนี้ จะนำสัญญาณจากวงจรมาตีมอดูเลตและเปรียบเทียบกับความถี่อ้างอิงเพื่อใช้หาทิศทางต่อไป

3.3.4 การทดสอบเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

การทดสอบเครื่องรับวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์จะใช้โปรแกรม SDRSharp เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จะใช้ตีมอดูเลตจากเครื่องรับวิทยุได้โดยตรง โดยทดลองจูนเครื่องรับไปที่ความถี่วิทยุหนึ่งๆ ยกตัวอย่างเช่น 100.25 เมกะเฮิร์ตซ์ดังภาพที่ 3.39

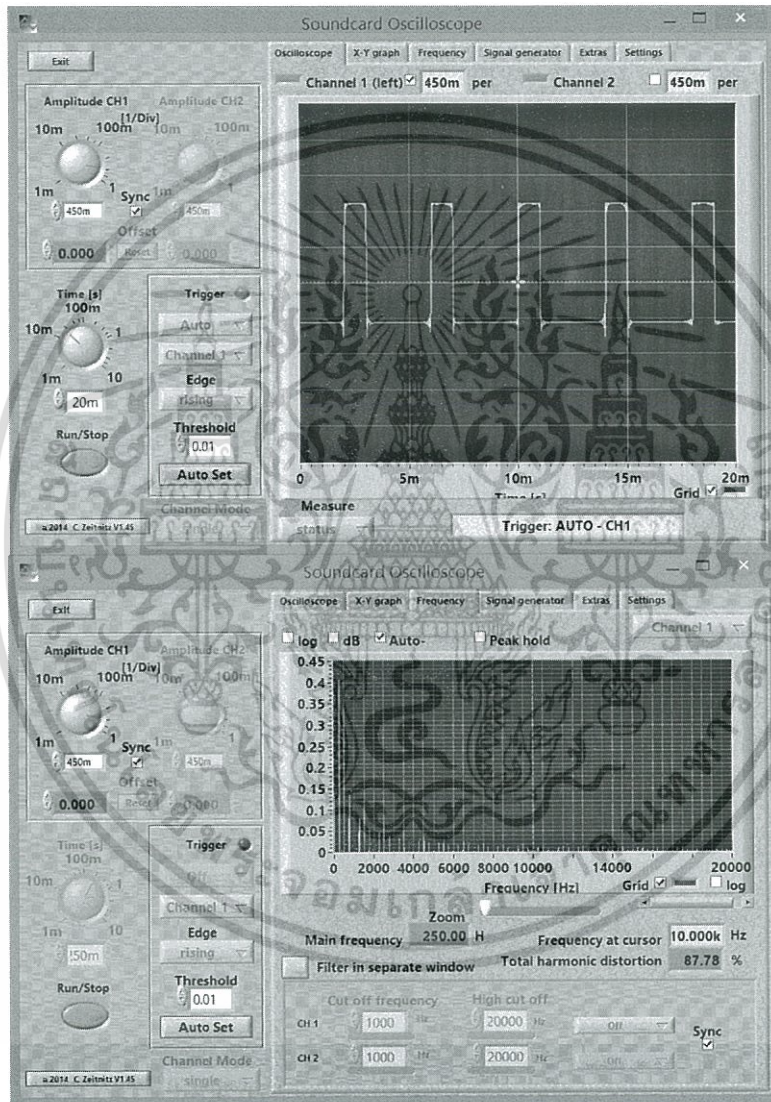


รูปที่ 3.39 หน้าต่างโปรแกรม SDRSharp ตีมอดูเลตสัญญาณจากเครื่องรับ

จากรูปที่ 3.39 เมื่อใช้โปรแกรม SDRSharp ในการตีมอดูเลตสัญญาณจากเครื่องรับจะได้ยินเสียงที่เกิดจากการจำลองการหมุนของสายอากาศ และโปรแกรมสามารถแสดงถึงองค์ประกอบทางความถี่ที่เกิดจากการหมุนจากช่อง Audio Spectrum ด้านล่างขวา ดังนั้นผู้จัดทำจึงออกแบบโปรแกรมด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อใช้งานสัญญาณนี้ต่อไป

3.3.5 การใช้โปรแกรมแมทเลบปรับเข้าสัญญาณ และประมวลผลออกมาเป็นทิศทาง

การนำเข้าสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1 จะนำเข้าผ่านทางช่องไมโครโฟน โดยจะทดสอบกับโปรแกรมสำเร็จรูป Soundcard Oscilloscope โดยที่โปรแกรมนี้จะใช้ดูสัญญาณและองค์ประกอบทางความถี่ดังรูปที่ 3.40



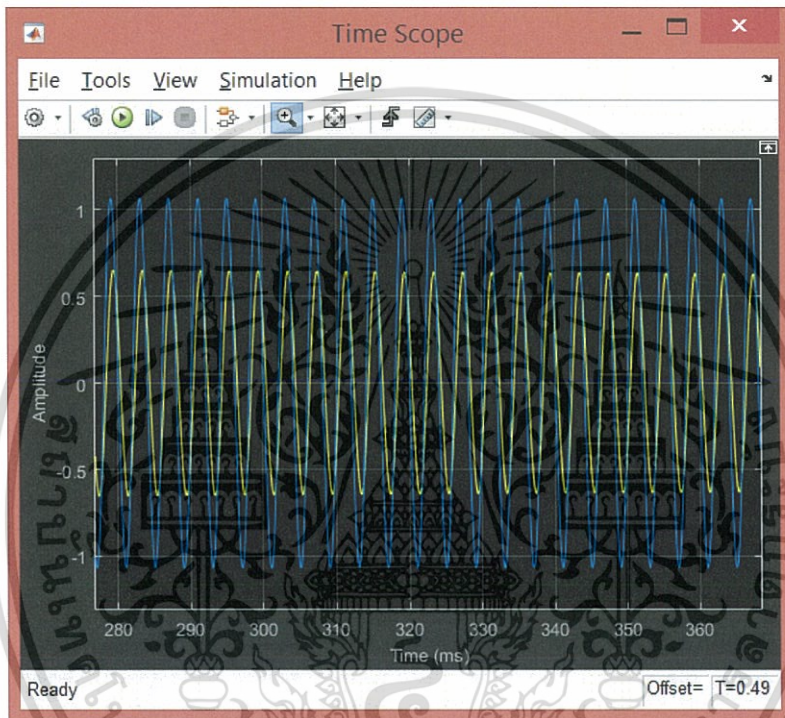
รูปที่ 3.40 โปรแกรม Soundcard Oscilloscope ที่ใช้วัดสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1

จากสัญญาณควบคุมรูปที่ 3.40 และสัญญาณที่ถูกตีמודูเลตรูปที่ 3.38 พบว่าสัญญาณจะมีองค์ประกอบทางความถี่อื่นๆที่ไม่ใช่ 250 เฮิร์ตซ์อยู่เป็นจำนวนมาก การที่จะนำสัญญาณทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

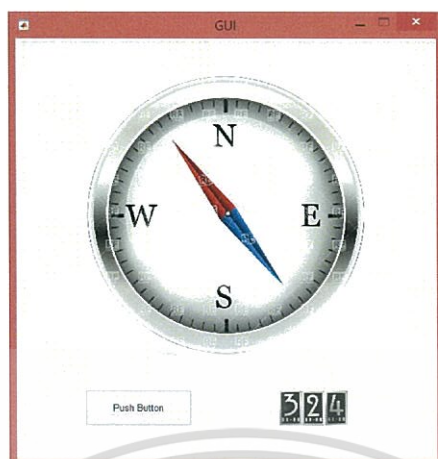
มาเปรียบเทียบเฟสเพื่อหาทิศทาง จำเป็นที่จะต้องนำองค์ประกอบทางความถี่อื่นๆออกไป ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงนำสัญญาณทั้งสองเข้ามายังโปรแกรมแมทแล็บ โดยมีฟิลเตอร์ที่นำความถี่เฉพาะย่าน 250 เฮิรตซ์มาใช้เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ

การเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อที่จะหาความต่างเฟส โดยในระหว่างที่โปรแกรมกำลังทำงานก็จะแสดงสัญญาณออกมาดังรูปที่ 3.41 และแสดงมุมของเครื่องรับเก็บไว้ที่ตัวแปร และนำมาเฉลี่ยจนได้ค่าออกมาพร้อมทั้งแสดงทิศทางเป็นรูปเข็มทิศดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.41 สัญญาณควบคุมสายอากาศ (สีเหลือง) และสัญญาณที่ถูกตีมอดูเลตจากเครื่องรับ (สีฟ้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 ทิศทางของเครื่องส่งสัญญาณ

สำหรับผลการทดสอบระบบในเบื้องต้นนั้น จากที่ผู้ทำการทดลองได้ตั้งเครื่องส่งวิทยุไว้ที่มุม 0 องศา และจากรูปที่ 3.41 และ 3.42 ผลการทดลองได้แสดงมุมที่ระบบวัดได้เท่ากับ 324 องศา ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากทิศทางจริงอยู่บ้าง เนื่องจากการเกิดดีเลย์ขึ้นในระบบ SDR ทำให้สัญญาณที่เข้ามาเกิดการเลื่อนเฟส ค่ามุมที่ระบบวัดได้ จึงยังไม่มีความแม่นยำที่สูงมากนัก

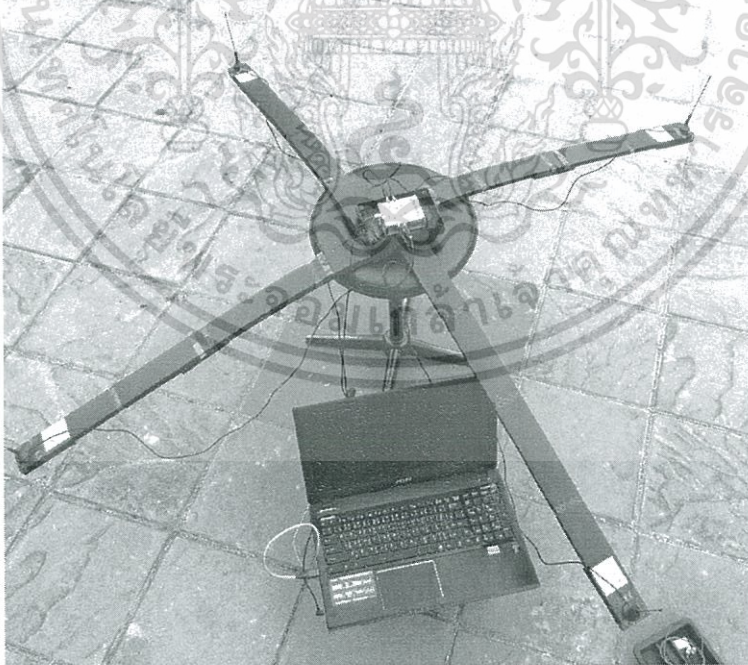
บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดผลการทดลองในส่วนของโปรแกรมแมทแล็บ ที่จะอ่านสัญญาณที่ได้จาก RTL-SDR จากนั้นจึงวัดสัญญาณหลังจากนำไปผ่านวงจรเลือกความถี่ผ่าน (Band-pass filter) และสุดท้ายคือส่วนของกราฟิกประสานงานกับผู้ใช้ที่แสดงผลจากมุมที่เฉลี่ยจากการวัดค่าหลายๆครั้ง

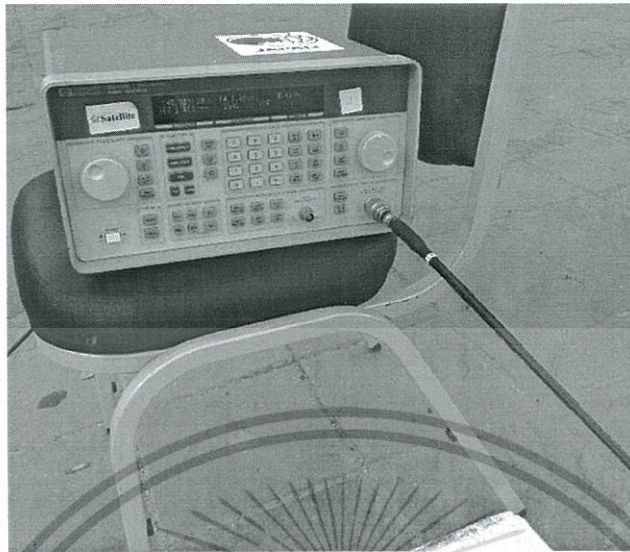
4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง

ในเบื้องต้นจะทำการหาความแม่นยำในการวัดมุมของระบบ เนื่องจากการคำนวณต่างๆในคอมพิวเตอร์ รวมทั้งฟิลเตอร์ที่ใช้กับสัญญาณอาจจะทำให้เกิดดีเลย์ในระบบขึ้น ส่งผลให้ค่าความต่างเฟสมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเพื่อหาทิศทางของเครื่องส่ง จำเป็นที่จะต้องหาค่ามุมที่คำนวณได้จากเครื่องส่งทิศทางเดียวหลายๆครั้งเพื่อหาความแม่นยำ การวางเครื่องส่งและเครื่องรับในการทดลองดังกล่าวจะมีการวางตำแหน่งดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 การจัดตั้งเครื่องรับวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การจัดตั้งตำแหน่งเครื่องส่งวิทยุ

เครื่องส่ง



เครื่องรับ

รูปที่ 4.3 มุมมองของตำแหน่งเครื่องส่งและเครื่องรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

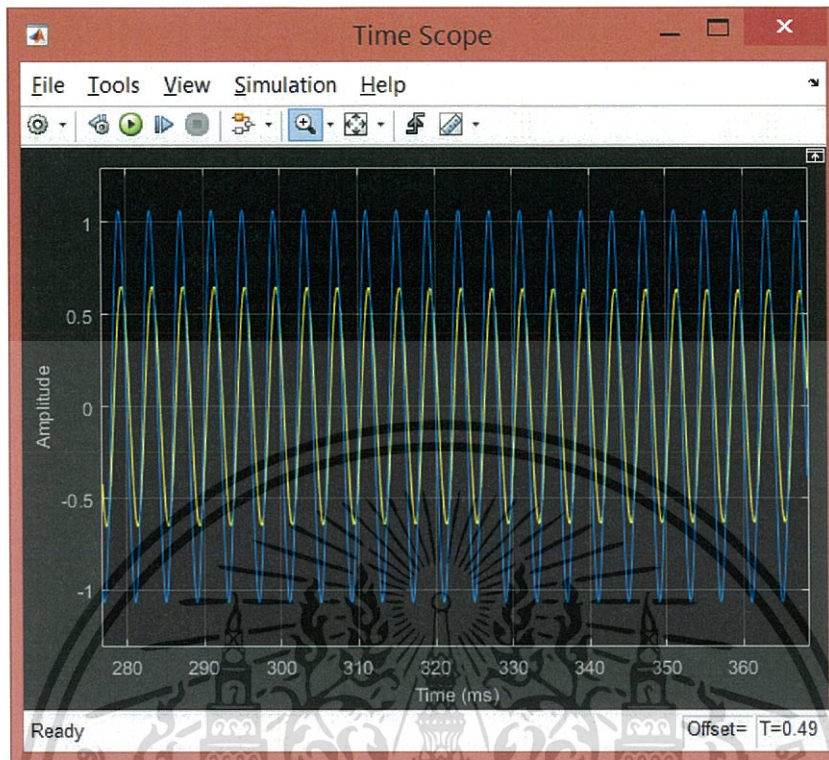
การวัดมุมกวาดของเครื่องส่งจะใช้วิธีวัดจากสายอากาศต้นที่ 1 ที่วางหันไปทางเครื่องส่งในรูปที่ 4.3 และทิศทางของเครื่องส่งจะอยู่ที่มุม 0 องศาโดยใช้ความถี่เครื่องส่งที่ 245.000 เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นผลที่คาดหวังกรณีที่ไม่เกิดดีเลย์ในระบบขึ้นควรจะได้มุมกวาดที่ประมาณ 0 องศาหรือใกล้เคียง

4.2 ผลการทดลองการอ่านสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ SDR



รูปที่ 4.4 สัญญาณจากเครื่องรับหลังถูกดีมอดูเลต

จากสัญญาณรูปที่ 4.4 ที่ผ่านการดีมอดูเลตแล้ว ในช่วงต้นของสัญญาณ 10 มิลลิวินาทีแรก จะเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถให้ข้อมูลที่มีนัยสำคัญได้ แต่หลังจากพ้นช่วง 10 มิลลิวินาทีไปแล้ว จะเริ่มเกิดการซ้ำคาบที่เกิดจากผลของดอปเพลอร์ การหาองค์ประกอบทางความถี่ที่ใช้จึงต้องผ่านฟิลเตอร์ที่ใช้เลือกความถี่ออกมา

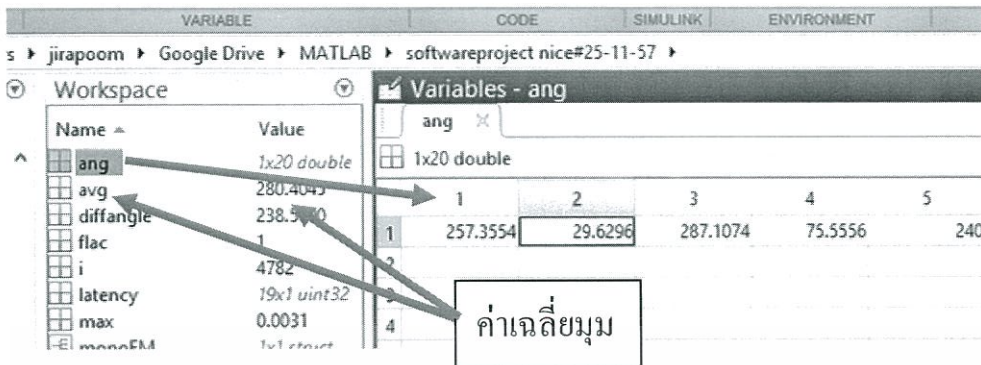


รูปที่ 4.5 สัญญาณหลังจากผ่านฟิลเตอร์เลือกความถี่

จากสัญญาณรูปที่ 4.5 เมื่อนำวงจรผ่านฟิลเตอร์เลือกความถี่แล้ว (สัญญาณรูปสี่ฟ้า) จะทำให้ได้สัญญาณรูปไซน์ออกมา เมื่อนำสัญญาณนี้ไปหาความต่างเฟสกับสัญญาณควบคุมสายอากาศช่องที่ 1 (สีเหลือง) ก็จะได้มุมกวาดที่เป็นทิศทางของเครื่องส่งออกมาได้

4.3 การประมวลผลและแสดงผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

มุมกวาดที่หาได้ในแต่ละครั้งจะนำไปเฉลี่ยด้วยวิธีเฉลี่ยเฉพาะที่ใช้กับมุมกวาด ตัวอย่างข้อมูลที่เก็บค่าทั้งหมด 20 ครั้งจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรในโปรแกรมแมทแล็บชื่อว่า ans และเก็บค่าเฉลี่ยไว้ในตัวแปร avg ดังรูปที่ 4.6

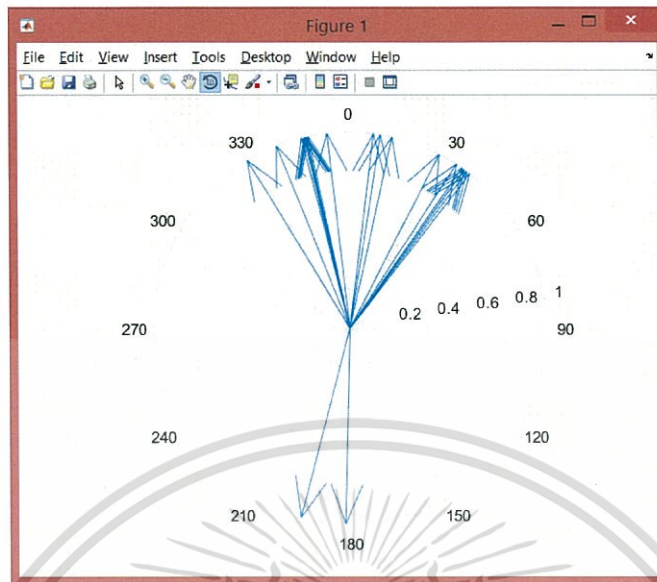


รูปที่ 4.6 การเก็บค่ามุมในตัวแปร ans และค่าเฉลี่ยในตัวแปร avg

ตารางที่ 4.1 การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา

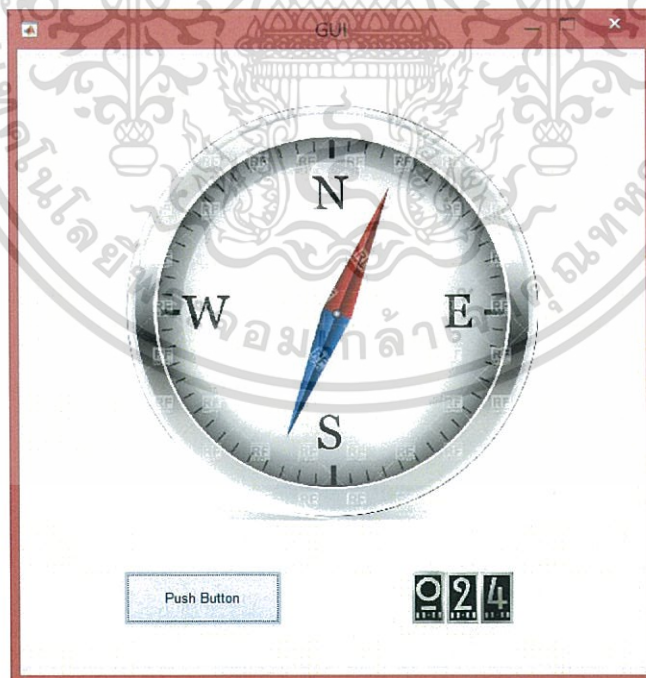
ครั้งที่	มุม (องศา)
1	38.03828
2	33.20476
3	194.7347
4	7.106293
5	345.8559
6	347.8852
7	353.4998
8	346.6118
9	338.2465
10	328.7447
11	9.204062
12	35.243
13	347.3445
14	12.6979
15	347.0154
16	35.98032
17	181.4397
18	36.03801
19	36.95347
20	27.48672
ค่าเฉลี่ย	24.4867

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยมุมออกมาแล้ว ส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ก็จะแสดงมุมกวาดที่แสดงถึงทิศทางของเครื่องส่งดังภาพที่ 4.8



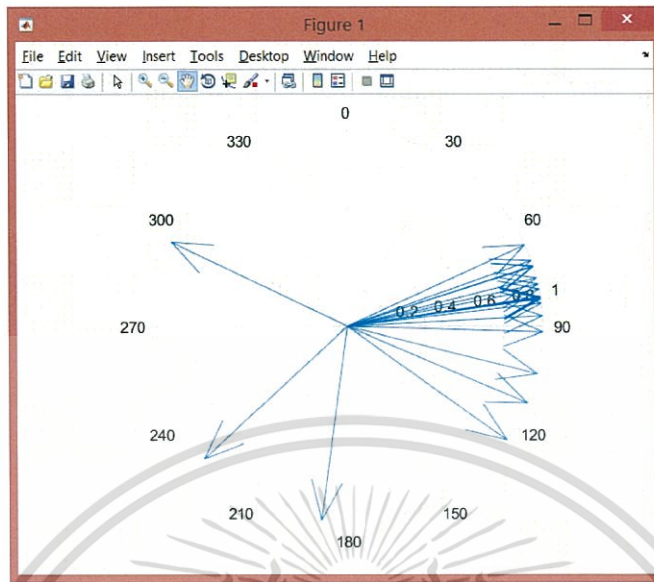
รูปที่ 4.8 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเก็บผลมุมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา

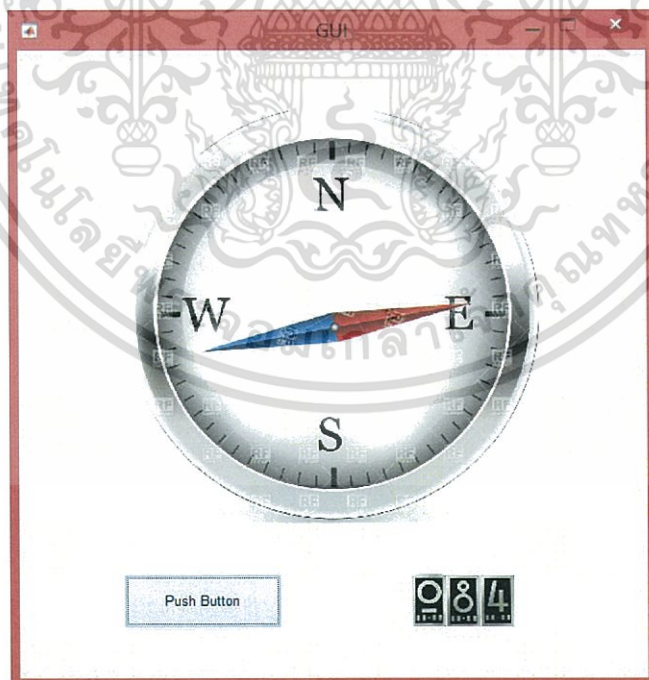
ครั้งที่	มุม (องศา)
1	125.5684
2	104.0575
3	72.16014
4	187.8631
5	72.15747
6	91.69282
7	295.6581
8	81.64661
9	72.00254
10	227.3772
11	113.1271
12	81.34954
13	79.00098
14	81.92645
15	65.34568
16	75.63355
17	70.28622
18	86.99662
19	77.46515
20	83.23369
ค่าเฉลี่ย	83.2337

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยมุมออกมาแล้ว ส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ก็จะแสดงมุมกวาดที่แสดงถึงทิศทางของเครื่องส่งดังภาพที่ 4.10



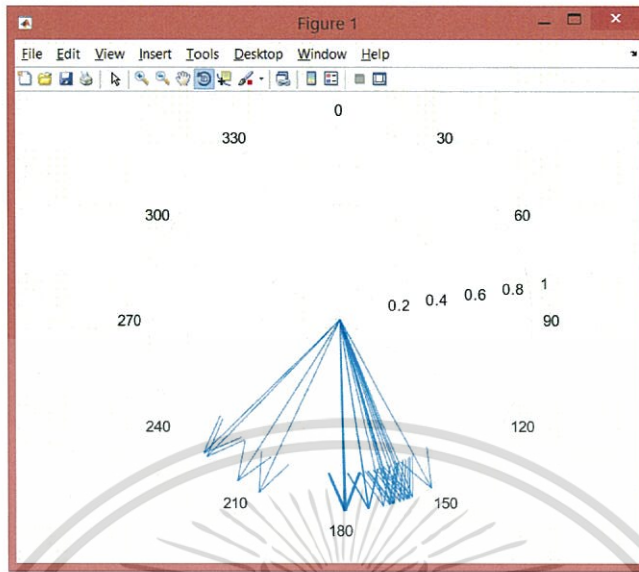
รูปที่ 4.10 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเก็บผลมูมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมูม 180 องศา

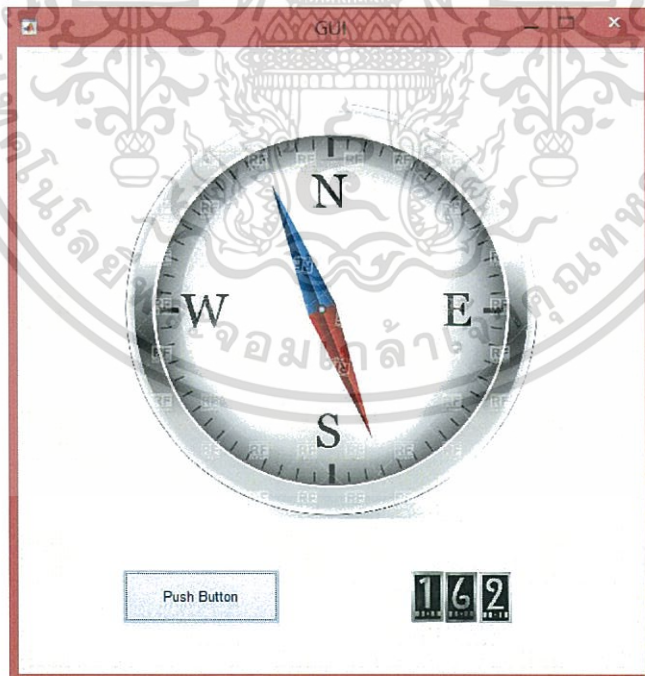
ครั้งที่	มูม (องศา)
1	224.2346
2	165.0562
3	157.969
4	178.6575
5	165.0959
6	205.3233
7	162.0049
8	171.5145
9	225.6833
10	151.6642
11	159.6793
12	167.05
13	178.3424
14	212.5321
15	160.788
16	163.8608
17	178.9999
18	171.7267
19	158.9802
20	164.2979
ค่าเฉลี่ย	164.2979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 180 องศา

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยมุมออกมาแล้ว ส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ก็จะแสดงมุมกวาดที่แสดงถึงทิศทางของเครื่องส่งดังภาพที่ 4.12



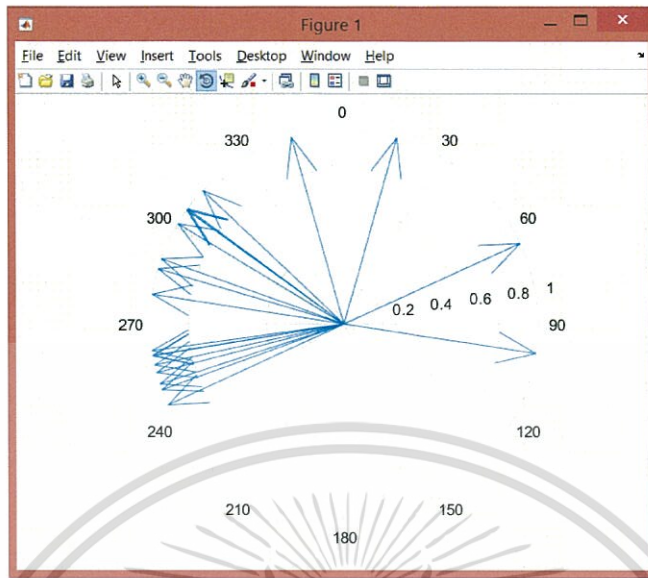
รูปที่ 4.12 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเก็บผลมูมกวาดทั้งหมด 20 ครั้ง กรณีเครื่องส่งทำมูม 270 องศา

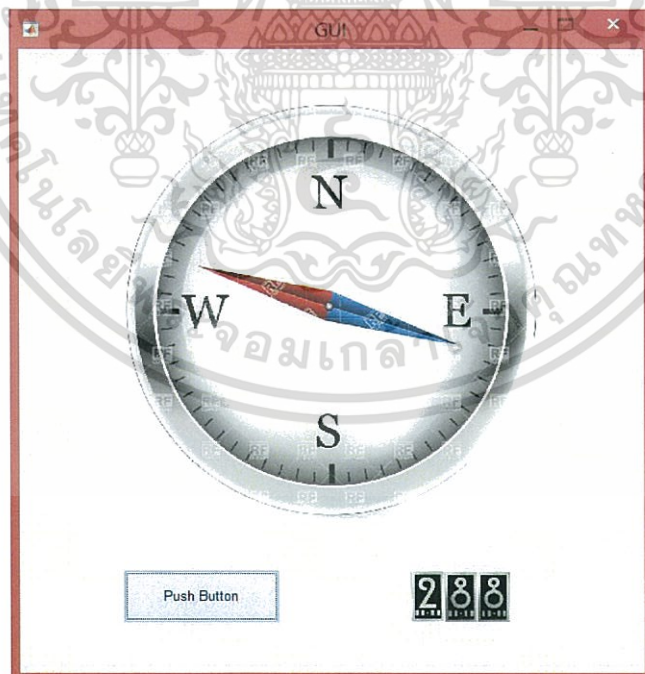
ครั้งที่	มูม (องศา)
1	278.7618
2	245.2801
3	251.8864
4	306.0419
5	250.1029
6	305.9756
7	260.4778
8	98.75539
9	260.6213
10	257.7182
11	301.1464
12	313.4477
13	344.3907
14	65.40073
15	15.96045
16	306.4754
17	255.3991
18	262.0207
19	286.4884
20	289.6113
ค่าเฉลี่ย	289.6113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 มุมที่นำมาพล็อตเป็นกราฟ กรณีเครื่องส่งทำมุม 270 องศา

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยมุมออกมาแล้ว ส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ก็จะแสดงมุมกวาดที่แสดงถึงทิศทางของเครื่องส่งดังภาพที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การแสดงทิศทางจากส่วนกราฟที่ประสานงานกับผู้ใช้ กรณีเครื่องส่งทำมุม 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การคำนวณมุมกวาดที่ออกมาจากโครงการนี้เกิดจากการประมวลผลสัญญาณที่เลือกความถี่จากผู้ใช้ออกมา โดยจะมีปัญหาและแนวทางแก้ไขดังนี้

1. มุมที่คำนวณได้จากแมทแปล์จะยังไม่มีความแม่นยำนัก ในส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะสัญญาณรบกวน สภาพแวดล้อมที่ทำการทดสอบ รวมถึงการเกิดดีเลย์ขึ้นในระบบดิจิทัลของ SDR อาจจะทำให้เกิดการจำกัดสภาพแวดล้อมในการทดสอบที่สามารถควบคุมได้ เช่นการทดสอบในที่โล่ง ใช้งานความถี่ที่ไม่มีการรบกวนจากเครื่องส่งอื่นๆในขณะนั้น หรือปรับแก้ค่าการดีเลย์ที่เกิดขึ้น

2. การประมวลผลยังใช้เวลานาน และยังไม่สามารถประมวลผลแบบเวลาจริงได้ อาจจะต้องลดการประมวลผลที่ไม่จำเป็น และปรับปรุงประสิทธิภาพในส่วนซอฟต์แวร์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบค้นหาทิศทางเครื่องส่งวิทยุยังมีข้อจำกัดอีกหลายประการ เช่นความถี่ที่ให้เลือกใช้ เนื่องจากความสามารถของตัว RTL-SDR การเพิ่มความถี่ของเครื่องรับอาจจะเปลี่ยนรุ่นของ RTL-SDR ให้รองรับกับความถี่ที่ต้องการ

บรรณานุกรม

- [1] S. E. Lipsky, Microwave Passive Direction Finding, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [2] P. Gething, Radio Direction-Finding and the Resolution of Multicomponent Wavefields, London: Peter Peregrinus Ltd., 1978.
- [3] P. Gething, Radio Direction Finding and Superresolution, London: Peter Peregrinus Ltd., 1991.
- [4] R. Boylestad, Electronic Devices and Circuit Theory, New Jersey: Prentice Hall., 2009.
- [5] D. N. Aloji and M. S. Sharawi, "Modeling and Validation of a 915MHz Single Channel Pseudo Doppler Direction Finding System for Vehicle Applications," Electrical and Computer, Engineering Department, Oakland University Rochester, Michigan 48309, USA., 2009.
- [6] Joseph D. Moell and Thomas N. Curlee "Transmitter Hunting Radio Direction Finding Simplified," New York: McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [7] Terrence Rogers, WA4BVY, "A DoppleScAnt" QST, May, 1978 pp 24-28.
- [8] <http://gpsworld.com/building-a-wide-band-multi-constellation-receiver/>
- [9] <http://www.rtl-sdr.com>
- [10] <http://www.intechopen.com/books/ultra-wideband-communications-novel-trends-system-architecture-and-implementation/ultra-wideband-rf-transceiver-design-in-cmos-technology>
- [11] M. Kossor, "A Doppler Radio-Direction Finder Part 2," QST, pp. 37-40, June 1999.
- [12] <https://orapanwaipan.wordpress.com>