



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)  
ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบแม่นยำโดยใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย Precise Localization with Wireless Sensor Network
نامผู้วิจัย	นายหนึ่ง จรรย์รุ่งโรจน์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดุสิต ธนเพทาย, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D. )
รักษาราชการแทน หัวหน้าภาควิชา	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร จงบุรี, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบแม่นยำโดยใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

Precise Localization with Wireless Sensor Network

โดย

นายหนึ่ง จรรย์รุ่งโรจน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หนึ่ง จริญญาโรจน์ 2555: อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบแม่นยำโดยใช้เครือข่ายดาวรับรู้ไร้  
สาย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดุสิต ชนพิทย, Ph.D. 69 หน้า

การประมาณระยะทางโดยใช้เวลาที่ถูกละทิ้งจากการส่งสัญญาณนั้น จะมีความเที่ยงตรง  
มากกว่าการใช้กำลังงานของสัญญาณที่สูญเสียไปเนื่องจากการส่งสัญญาณ แต่การใช้เวลาที่ถูกละ  
ทิ้งนั้นจะมีความยากในการจัดการและต้องการอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ซับซ้อนมากกว่าวิธีการ  
ประมาณจากกำลังงานของสัญญาณที่สูญเสีย

แบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้นั้น จะอาศัยการประมาณระยะทางโดยการใช้เวลาที่  
ถูกละทิ้งจากการส่งสัญญาณ ซึ่งจะใช้เพียงอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์พื้นฐานเท่านั้น โดยวิธีการจะเริ่มจาก  
การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปยังอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุปกรณ์ตัวนั้นได้รับ  
สัญญาณแล้วก็จะทำการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ที่ส่งมา ดังนั้นค่าเวลาที่ถูกละทิ้งจากการส่ง  
สัญญาณสามารถหาได้โดยใช้ความค่าคลาดเคลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณที่ส่งไปกับสัญญาณที่รับ  
กลับ ประกอบกับการใช้จำนวนรอบของสัญญาณที่ส่งไปก่อนที่จะได้รับสัญญาณกลับมา และเมื่อ  
ได้ค่าเวลาที่ถูกละทิ้งแล้วก็จะสามารถนำไปหารระยะทางระหว่างอุปกรณ์ได้ต่อไป

Nueng Jarunroungrok 2012: Precise Localization with Wireless Sensor Network.  
Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering,  
Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor  
Dusit Thanapatay, Ph.D. 69 pages.

Distance estimation based on time delay is more accuracy than the estimation based on power attenuation method, but it is hard to handle and needs so complicated hardware.

The proposed model of this research based on time delay to estimate a distance by using basic hardware to send a signal from one device and then the other device send it back. So, the time delay can be determined by using phase difference between sending and receiving signals and number of sending signal cycle before receiving signal available at sending devices and use that time delay to estimate the distance.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุณุต ชนเพทาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำในการทำงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีระบบอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์ (Biomedical Electronics System and Technology Laboratory) ห้องวิจัยร่วมทางโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์และระบบสมองกลฝังตัว ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (NTC Telecommunication Research Laboratory) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรม โทรคมนาคม (TRIDI) ที่ให้การสนับสนุนทุนที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ตลอดจนเพื่อนๆทุกคน ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

หนึ่ง จรรย์รุ่งโรจน์

เมษายน 2555

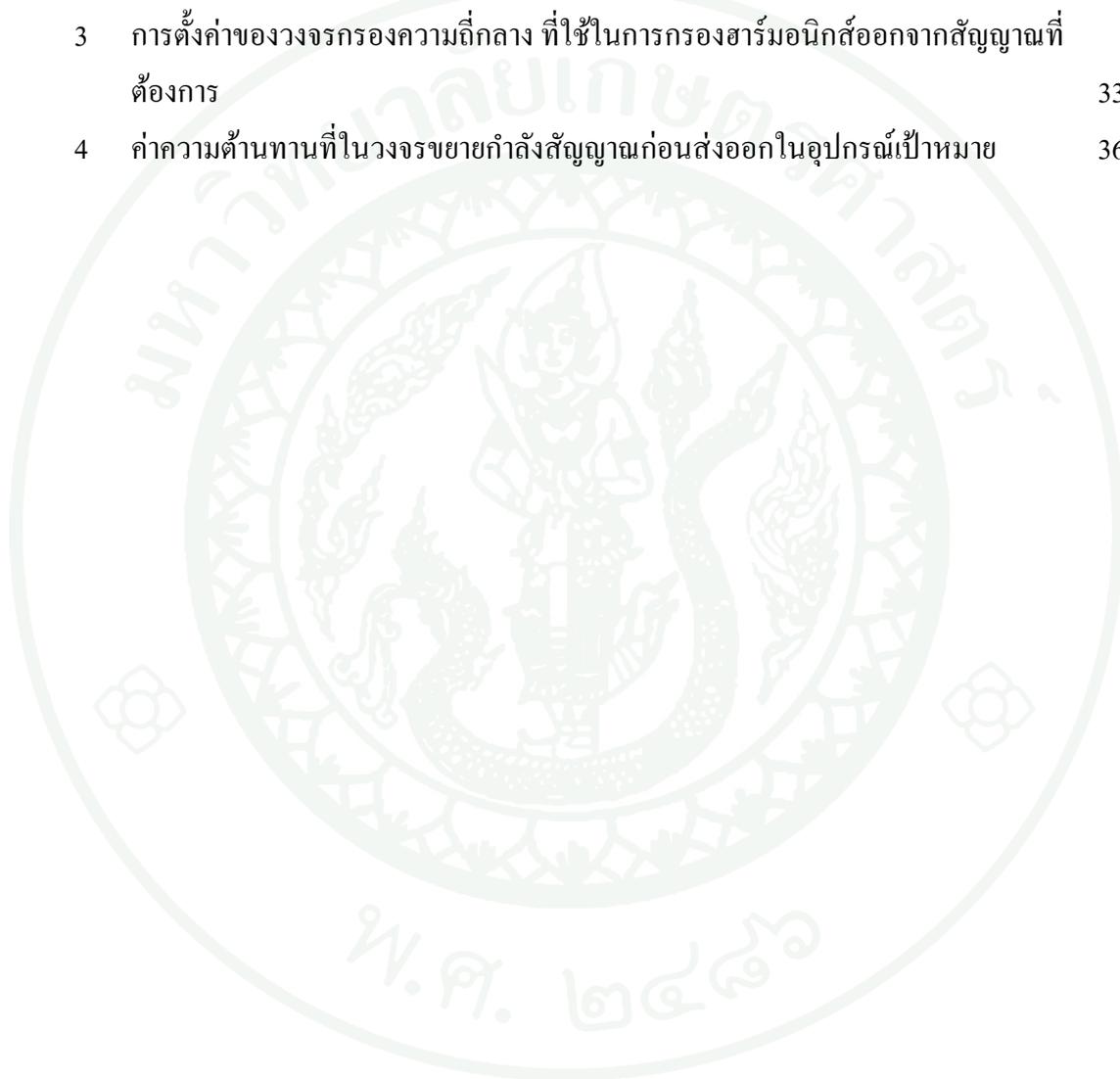
## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	6
อุปกรณ์	6
วิธีการ	6
ผลและวิจารณ์	43
ผล	43
วิจารณ์	65
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การตั้งค่าของวงจรกำเนิดคลื่นไซน์	13
2	การตั้งค่าของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 433 MHz	30
3	การตั้งค่าของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกส์ออกจากสัญญาณที่ต้องการ	33
4	ค่าความต้านทานที่ในวงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออกในอุปกรณ์เป้าหมาย	36



## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ปรากฏบนอุปกรณ์ภาครับกับระยะทาง	3
2	วิธีการหาตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ต้องการหาตำแหน่งโดยใช้อุปกรณ์ที่อยู่กับที่	5
3	ภาพแสดงการวางของตัวอุปกรณ์	6
4	อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่เริ่มส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง	7
5	อุปกรณ์เป้าหมายทำการคูณความถี่ของสัญญาณและส่งกลับไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่	7
6	ภาพแสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณส่งออก(สีน้ำเงิน) กับสัญญาณตอบกลับ(สีแดง)	8
7	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่	10
8	แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย	10
9	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	11
10	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน 433MHz Sine Generator)	12
11	วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีให้ใช้ใน Simulink อยู่แล้ว	12
12	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Signals Conditionin Circuit)	13
13	ภาพวงจร Non-inverting Schmitt trigger	14
14	ภาพวงจร Non-inverting Schmitt trigger บน Simulink	15
15	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)	15
16	ภาพวงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter	16
17	ภาพวงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter บน Simulink	18
18	Bode plot ของ วงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter ที่ใช้ในการทดลอง	18
19	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Counter)	19
20	วิธีการนำ D Flip-Flop มาต่อเป็นวงจรรนับ	19
21	วงจรรนับขนาด 8 บิต บน Simulink	20
22	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Phase Detector)	21
23	วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสพร้อม Second-Order RC Low-Pass Filter บน Simulink	23
24	วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสตั้งแต่ 0° ถึง 360° บน Simulink	24
25	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Stop Signal Generator)	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
26	วงจรสร้างสัญญาณหยุดนับจากสัญญาณตอบกลับบน Simulink	25
27	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Power Amplifier)	26
28	วงจร Non-Inverting Amplifier	26
29	วงจรขยายกำลังแบบ Non-Inverting Amplifier บน Simulink	28
30	แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่บน Simulink	29
31	แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน 433MHz Band-Pass Filter)	30
32	แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน Frequency Multiplier)	31
33	แผนผังรูปภาพภายในวงจรคูณความถี่ 2 เท่า	31
34	วงจร Phase shifter บน Simulink	33
35	วงจร Phase shifter พร้อมวงจรขยายแรงดัน บน Simulink	35
36	แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน Power Amplifier)	35
37	แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมายบน Simulink	36
38	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Delay)	37
39	อุปกรณ์เลื่อนเวลาของสัญญาณ ที่มีให้ใช้งานบน Simulink	37
40	หน้าต่างตั้งค่าของอุปกรณ์เลื่อนเวลา	38
41	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Power Attenuation)	38
42	อุปกรณ์ตั้งค่า Gain ของสัญญาณ ที่มีให้ใช้งานบน Simulink	39
43	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน White Noise)	39
44	อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรบกวนในรูปแบบ White noise ที่มีให้ใช้งานบน Simulink	40
45	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Multipath)	41
46	แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	41
47	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองบน Simulink	42
48	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 433MHz Sine Generator)	45
49	สัญญาณเอาท์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz (5ns/div)	45
50	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Power Amplifier)	46

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ผลการทดลองของวงจรขยายกำลังสัญญาณ	46
52	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วนแบบจำลองช่องสัญญาณ)	47
53	ผลการทดลองของช่องสัญญาณ โดยกราฟบนคือสัญญาณก่อนส่งและกราฟล่างคือสัญญาณหลังส่ง	47
54	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 433MHz Band-Pass Filter)	48
55	สัญญาณก่อนเข้าวงจรก่อน(กราฟบน) และสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแล้ว(กราฟล่าง)	48
56	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Frequency Multiplier และ Power Amplifier)	49
57	สัญญาณก่อนเข้าวงจรคูณความถี่(กราฟบน) สัญญาณเมื่อผ่านวงจรคูณความถี่แล้ว (กราฟกลาง) และสัญญาณเมื่อผ่านวงจรขยายกำลัง(กราฟล่าง)	49
58	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)	50
59	ผลการทดลองวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz	51
60	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)	51
61	ผลการทดลองที่ได้จากวงจรรอกความถี่(กราฟบน) วงจรแปลงสัญญาณ (กราฟกลาง) และวงจรหารความถี่(กราฟล่าง)	52
62	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Stop Signal Generator)	53
63	ผลการทดลองที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ(กราฟกลาง) สัญญาณที่นำไปขับ วงจรนับ(กราฟล่าง) และสัญญาณส่งออกซึ่งในรูปแบบของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (กราฟบน)	53
64	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Counter)	54
65	ผลการทดลองของวงจรถับ	54
66	แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Phase Detector)	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
67	ผลการทดลองหาผลของวงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส	55
68	กราฟแสดงผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนขององค์ประกอบไฟตรงเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง	56
69	กราฟแสดงผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนของสัญญาณบอกช่วงความคลาดเคลื่อนเฟสเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง	57
70	กราฟแสดงผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนเฟสเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง	58
71	กราฟแสดงผลของวงจรนับเปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง	59
72	กราฟแสดงระยะทางที่ได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง	60
73	กราฟแสดงระยะทางที่ได้จากผลการทดลองเมื่อทำการลบค่า offset ออกแล้ว (กราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง	61
74	กราฟแสดงค่า error ที่ได้ เปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง	61
75	ตำแหน่งการวางของอุปกรณ์เป้าหมายที่ใช้ในการทดลองหาพิกัด และตำแหน่งการวางของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ทั้ง 3 ตัว	62
76	ผลการทดลองหาตำแหน่งของอุปกรณ์เป้าหมาย(กราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่ใช้ในการทดลอง พร้อมตำแหน่งของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่	64
77	ค่าตำแหน่งผิดพลาดที่ได้ในการทดลองแยกตามแนวแกนต่างๆ	64

# อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบแม่นยำโดยใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

## Precise Localization with Wireless Sensor Network

### คำนำ

เนื่องจากงานบางอย่างต้องการการระบุตำแหน่งหรือการวัดระยะทางที่แม่นยำ แต่อุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถรองรับความต้องการในบางสถานการณ์ได้ เช่น การระบุตำแหน่งของคนหรือวัตถุภายในอาคารด้วยอุปกรณ์ GPS, การหาระยะห่างระหว่างวัตถุ, การหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นต้น และเนื่องจากระยะห่างหรือตำแหน่งของวัตถุเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์สภาพทางกายภาพของสิ่งต่างๆ เช่น สภาพการเคลื่อนไหวของวัตถุ ความหนาแน่นหรือการกระจายตัวของประชากร(เช่น สภาพการจราจรบนท้องถนน) ซึ่ง ข้อมูลที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนเพื่อปรับปรุงแก้ไข หรือบริหารจัดการในระบบที่เกี่ยวข้อง

ด้วยเหตุนี้จึงได้ริเริ่มทำการวิจัยเพื่อสร้างวิธีการและแบบจำลองใหม่ที่มีความแม่นยำในการหาระยะทางและสามารถลบข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบันได้

## วัตถุประสงค์

ศึกษางานวิจัยอื่นๆ ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบภายในวิธานิพนธ์ รวมถึงใช้  
ทฤษฎีต่างๆ ทดลองและวิจัย เพื่อให้ได้วิธีการและแบบจำลองใหม่ที่สามารถวัดระยะทาง  
ระหว่างวัตถุได้อย่างแม่นยำ และลบข้อจำกัดของวิธีการเดิมๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน



## การตรวจเอกสาร

ในปัจจุบันได้มีอุปกรณ์ที่ทำการวัดระยะห่างระหว่างตัวอุปกรณ์และระบุตำแหน่งด้วยเครื่องข่ายตัวรับรู้ไร้สายอยู่แล้ว แต่จะใช้หลักการของการนำค่าความเข้มของกำลังงานที่ได้รับ (Received Signal Strength) นำมาหาระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงค่าความเข้มของกำลังงานที่ได้รับเป็นระยะทางเป็นไปตามสมการด้านล่าง (Blumenthal et al., 2005; Grossmann et al., 2007)

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

โดยที่

$P_{TX}$  = กำลังงานที่ใช้ในการส่ง (Watt)

$P_{RX}$  = กำลังงานคงเหลือที่ปรากฏบนอุปกรณ์ภาครับ (Watt)

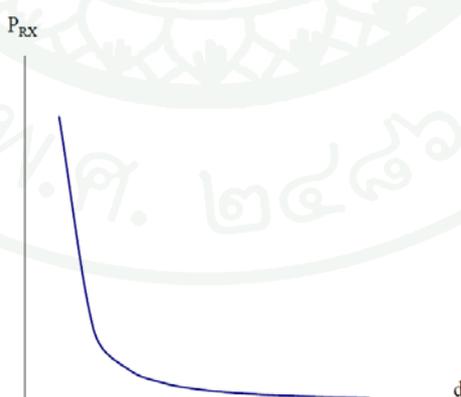
$G_{TX}$  = อัตราขยายของเสาอากาศบนอุปกรณ์ภาคส่ง

$G_{RX}$  = อัตราขยายของเสาอากาศบนอุปกรณ์ภาครับ

$\lambda$  = ความยาวคลื่น (m)

$d$  = ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ภาคส่งกับอุปกรณ์ภาครับ (m)

และสามารถสร้างกราฟค่าความเข้มของกำลังงานที่ได้รับกับระยะทางดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ปรากฏบนอุปกรณ์ภาครับกับระยะทาง

ที่มา: Grossmann et al. (2007)

แต่ในความเป็นจริงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกไปจะมีกำลังงานไม่เท่ากันทุกพื้นที่ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถถูกรบกวนได้จากหลายอย่าง มีผลทำให้การหาระยะทาง และการระบุตำแหน่งนั้นมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นในรูปแบบของตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าที่ไม่คงที่ ทำให้ต้องใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเข้ามาช่วย แต่ถึงจะใช้การคำนวณเข้ามาช่วยก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการใช้วิธีการหาระยะทางระหว่างอุปกรณ์ด้วยการใช้ค่าความหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นจากการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วแสงหรือ 299,792,458 เมตรต่อวินาที หรือประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที และสามารถหาระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้โดยสมการด้านล่าง (Bischoff et al., 2006; Chan et al., 2006)

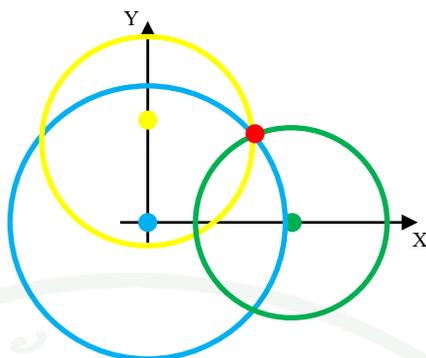
$$S = vt = ct = 3 \times 10^8 \cdot t$$

โดยที่

- S = ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ (m)
- v = ความเร็วที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในการเดินทาง (m/s)
- c = ความเร็วแสง (m/s)
- t = เวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้เดินทางจากตัวรับไปยังตัวส่ง (s)

จากสมการจะเห็นได้ว่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีค่าที่สูงมาก ซึ่งหากระยะทางที่ต้องการวัดนั้นเท่ากับ 1 เมตร จะได้ว่า เวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในการเดินทางมีค่าเพียง 3.3 นาโนวินาที เท่านั้น ซึ่งเป็นปัญหาในการตรวจวัดเป็นอย่างมาก ประกอบกับอุปกรณ์ที่มีความเร็วสูงนั้นสร้างได้ยากและราคาแพง จึงเป็นเหตุให้มีการทำวิจัยชิ้นนี้ขึ้น ซึ่งถ้าหากตรวจวัดค่าความหน่วงเวลาและหาระยะทางออกมาได้ ก็จะได้ค่าระยะทางที่แม่นยำ เนื่องจากความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นค่าคงที่

ส่วนการระบุตำแหน่งนั้นสามารถทำได้โดยการหาระยะทางระหว่างอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับที่ (Stationary Nodes) ที่และอุปกรณ์เป้าหมาย (Target Node) 3 คู่ ขึ้นไป จากนั้นนำระยะทางที่ได้มาทำการสร้างกราฟในปริภูมิ 3 มิติ และทำการหาจุดตัดที่เกิดขึ้น จะพบว่า มีจุดตัดเกิดขึ้นทั้งหมด 4 จุด แต่จะมีเพียงจุดเดียวที่เกิดจากการตัดกันของอุปกรณ์ทั้ง 3 คู่ ซึ่งจุดนั้นก็คือตำแหน่งของอุปกรณ์เป้าหมายนั่นเอง ซึ่งวิธีการหาตำแหน่งได้แสดงอยู่ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วิธีการหาค่าแทนของอุปกรณ์ที่ต้องการหาค่าแทนโดยใช้อุปกรณ์ที่อยู่กับที่



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมออกแบบและประมวลผลทางคณิตศาสตร์ MATLAB

### วิธีการ

#### 1. ทฤษฎี

พิจารณาอุปกรณ์ 2 ตัว ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ และอุปกรณ์เป้าหมาย โดยที่อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่เป็นอุปกรณ์ที่เราทราบตำแหน่งที่ชัดเจน และอุปกรณ์เป้าหมายคืออุปกรณ์ที่ต้องการจะรู้พิกัดหรือระยะห่าง โดยให้อุปกรณ์ทั้ง 2 วางอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง  $d$  ตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ภาพแสดงการวางของตัวอุปกรณ์

พิจารณาการรับ-ส่งสัญญาณดังนี้

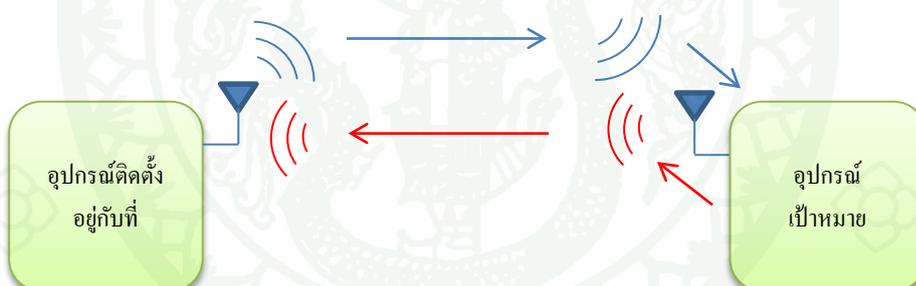
1. กำหนดให้ใช้สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433MHz เป็นพาหะในการส่งสัญญาณ
2. เริ่มต้นการกระบวนการเมื่ออุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์เป้าหมายอย่างต่อเนื่องตามภาพที่ 4 (ให้เรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณส่งออก)

3. เมื่ออุปกรณ์เป้าหมายได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่แล้ว อุปกรณ์เป้าหมายจะทำการคูณความถี่ของสัญญาณที่ได้รับมา เพิ่มเป็น 2 เท่า และทำการส่งสัญญาณนั้นกลับไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ตามภาพที่ 5 (ให้เรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณตอบกลับ)

4. เมื่ออุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ที่ได้รับสัญญาณตอบกลับมาแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือทำการหารความถี่ของสัญญาณด้วย 2 และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่กำลังส่งออกอย่างต่อเนื่องตามภาพที่ 6



ภาพที่ 4 อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่เริ่มส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง

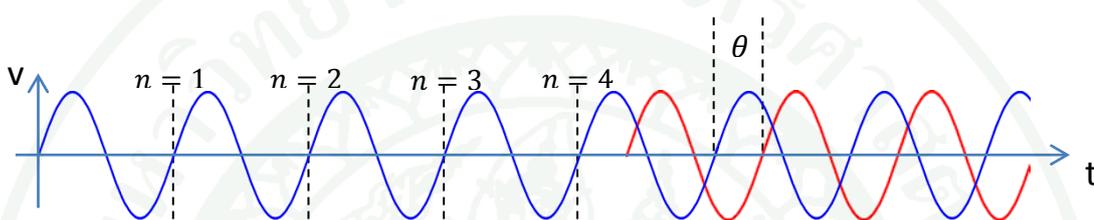


ภาพที่ 5 อุปกรณ์เป้าหมายทำการคูณความถี่ของสัญญาณและส่งกลับไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่

เมื่ออุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ทำการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์เป้าหมายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่เท่ากับความเร็วแสง ( $c$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 299,792,458 เมตรต่อวินาที ทำให้ทราบว่าค่าหน่วงเวลาของการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ไปยังอุปกรณ์เป้าหมายนั้นมีค่าเท่ากับ  $\frac{d}{c}$  จากนั้นอุปกรณ์เป้าหมายจะทำการส่งสัญญาณที่ได้รับกลับไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ และเมื่ออุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ที่ได้รับสัญญาณตอบกลับ ก็จะทราบว่า ค่าหน่วงเวลาทั้งหมดนับตั้งแต่อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ เริ่มส่งสัญญาณออก จนได้รับสัญญาณตอบกลับมีค่าเท่ากับ  $\frac{2d}{c}$

จากกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่า เราสามารถหา ระยะทางระหว่างตัวอุปกรณ์ได้จากค่าหน่วยเวลาที่ทั้งกระบวนการที่เกิดขึ้น ซึ่งเราจะทำการหา ค่าหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นนั้นในขั้นตอนถัดไป

หากพิจารณาสัญญาณพาหะที่ใช้ในการส่งซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นไซน์เมื่อเรานำสัญญาณ ส่งออกกับสัญญาณตอบกลับมาเปรียบเทียบกัน ตามในภาพที่ 6 จะพบว่า องค์ประกอบทาง สัญญาณที่สามารถระบุถึงค่าหน่วยเวลาได้คือ ค่าคลาดเคลื่อนเฟส (Phase shift,  $\theta$ ) ที่เกิดขึ้นกับ สัญญาณทั้งสองนั่นเอง



ภาพที่ 6 ภาพแสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณส่งออก(สีน้ำเงิน) กับสัญญาณตอบกลับ(สีแดง)

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะห่างระหว่างอุปกรณ์นั้นมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาว คลื่นของสัญญาณพาหะ จะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเฟสนั้นมีค่ากลับไปเริ่มต้นใหม่ที่  $0^\circ$  (เนื่องจาก ค่าคลาดเคลื่อนเฟสนั้นมีค่าอยู่ที่  $0^\circ-360^\circ$ ) จึงมีความจำเป็นต้องหาองค์ประกอบของสัญญาณ อื่นๆที่จะมาช่วยแก้ปัญหา ซึ่งก็คือจำนวนรอบของสัญญาณส่งออกก่อนที่จะได้รับสัญญาณ ตอบกลับ ( $n$ ) นั่นเอง

ซึ่งเมื่อเราสามารถหาค่าคลาดเคลื่อนเฟส และจำนวนรอบของสัญญาณได้แล้ว เราจะ สามารถหาค่าหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณนี้ได้จากสมการด้านล่าง

$$T_d = \left( n + \frac{\theta}{2\pi} \right) \frac{1}{f_c} + e_d$$

โดยที่

$T_d$  คือ ค่าหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณ (วินาที)

$\theta$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนเฟส (เรเดียน)

- $n$  คือ ค่าจำนวนรอบของสัญญาณส่งออกก่อนที่จะได้รับสัญญาณตอบกลับ
- $f_c$  คือ ความถี่ของสัญญาณพาหะที่ใช้ในกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณ (เฮิรตซ์)
- $e_d$  คือ ค่าหน่วยเวลาผิดพลาด (วินาที)

และเราสามารถหาระยะทางระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองได้โดยสมการด้านล่าง

$$d = \frac{c \times T_d}{2} = \left( n + \frac{\theta}{2\pi} \right) \frac{\lambda_c}{2} + e_s$$

โดยที่

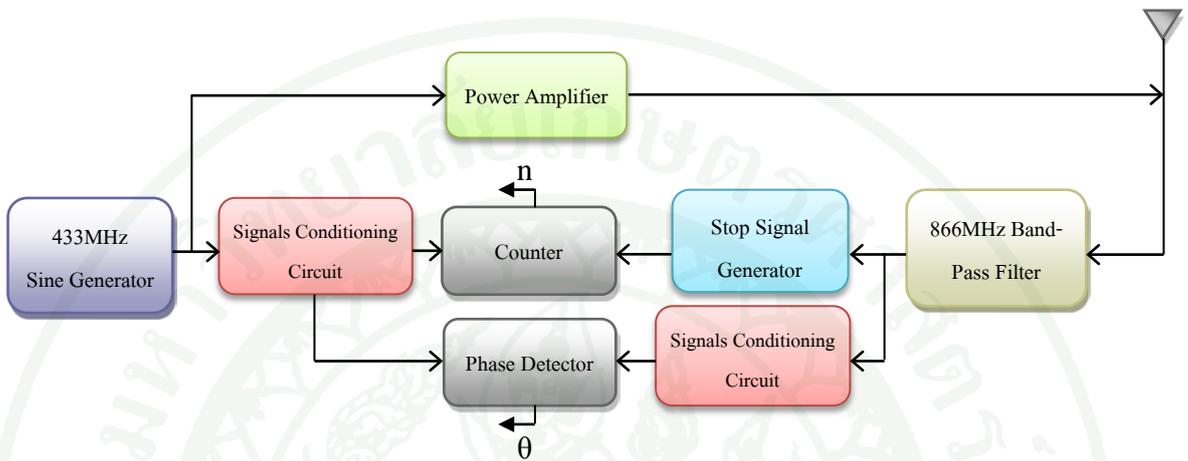
- $d$  คือ ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง (เมตร)
- $c$  คือ ค่าความเร็วของแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 299,792,458 (เมตรต่อวินาที)
- $\lambda_c$  คือ ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณพาหะที่ใช้ในกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณ (เมตร)
- $e_s$  คือ ระยะผิดพลาด (เมตร)

ซึ่งจากสมการที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า จะมีระยะผิดพลาด ( $e_s$ ) เป็นองค์ประกอบอยู่ในสมการ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการที่เกิดจากความไม่แน่นอนของวงจรที่ใช้งาน โดยแต่ละวงจรจะมีค่าคงที่เวลา (Time constant) อยู่ ซึ่งจะทำให้ค่าหน่วยเวลาของกระบวนการรับ-ส่งสัญญาณนั้นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดระยะผิดพลาดขึ้น แต่เนื่องจากค่าคงที่เวลานั้นมีลักษณะเป็นค่าคงที่ส่งผลให้ระยะผิดพลาดนั้นเป็นค่าคงที่เช่นกัน ซึ่งเราสามารถชดเชยค่าระยะผิดพลาดนี้ได้โดยการคำนวณค่าคงที่เวลาของแต่ละวงจรแล้วนำมาหักล้าง หรือทำการปรับเทียบ (calibration) โดยการนำค่าระยะห่างที่ได้จากการทดลองที่ระยะห่างจริงเท่ากับ 0 เมตร นำมาชดเชยกับสมการข้างต้น (เนื่องจากค่าระยะผิดพลาดนั้นมีพฤติกรรมเหมือน offset เราจึงสามารถทำการปรับเทียบที่ระยะห่างจริงเท่ากับ 0 เมตร ได้)

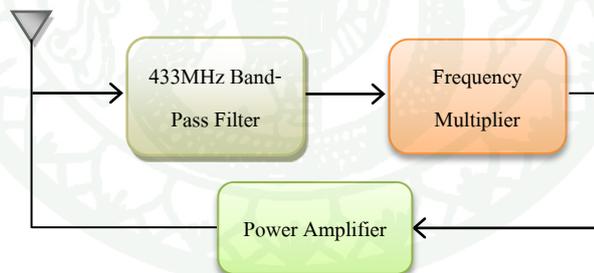
แต่อย่างไรก็ตาม การส่งสัญญาณในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั้น ย่อมเกิดสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของ multipath เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงต้องทำการแยกแยะสัญญาณตอบกลับกับสัญญาณรบกวน multipath ที่เกิดจากการส่งสัญญาณส่งออก โดยการเปลี่ยน

ความถี่ของสัญญาณตอบกลับ ซึ่งในการทดลองนี้เราได้ทำการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณตอบกลับให้มีความถี่เพิ่มขึ้นจากสัญญาณส่งออก 2 เท่า (866MHz)

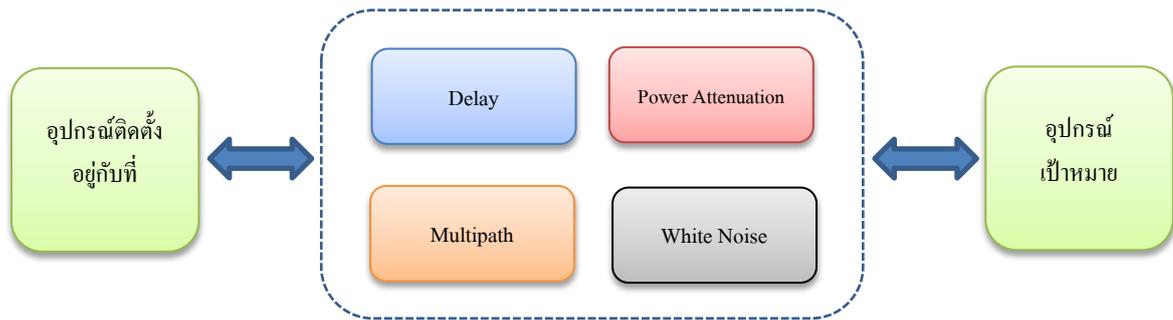
และจากทฤษฎีทั้งหมดทำให้เราสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังนี้



ภาพที่ 7 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่



ภาพที่ 8 แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย



ภาพที่ 9 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำโปรแกรมประยุกต์ MATLAB เวอร์ชัน 2010a ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลและคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการทดลอง อีกทั้งยังมี Simulink ที่ช่วยในการจำลองโมเดลทางไฟฟ้าอีกด้วย

เมื่อเราได้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการออกแบบวงจรภายในอุปกรณ์ต่างๆบน Simulink ซึ่งเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

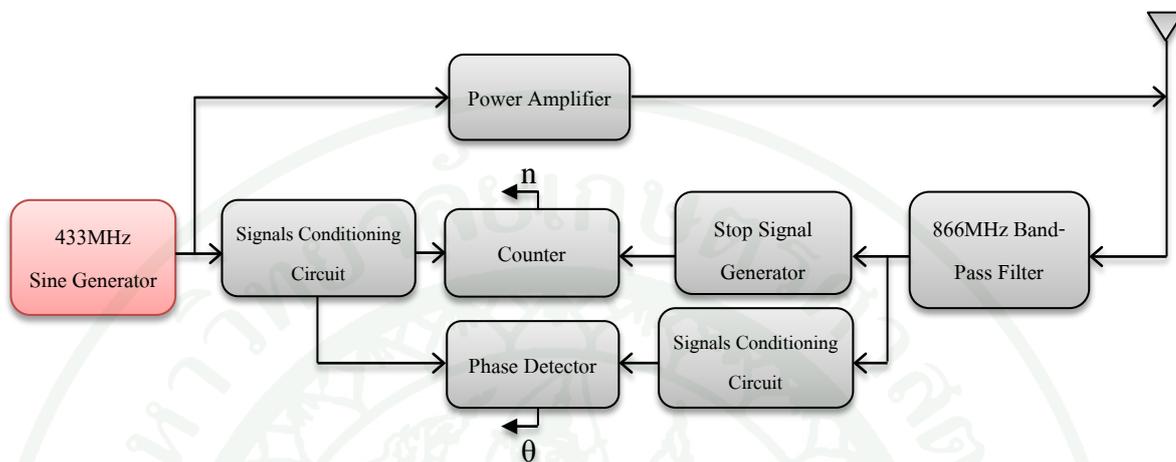
## 2. การออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่

จากแบบจำลองของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ในภาพที่ 7 สามารถเรียบเรียงวงจรภายในได้ดังนี้

1. วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz (433MHz Sine Generator)
2. วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นไซน์เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Signals Conditioning Circuit)
3. วงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz (866MHz Band-Pass Filter)
4. วงจรนับ ขนาด 8 บิต (Counter)
5. วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส (Phase detector)
6. วงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ เมื่อสัญญาณจากอุปกรณ์เป้าหมายมาถึง (Stop Signal Generator)
7. วงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก (Power Amplifier)

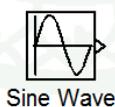
ซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบของแต่ละวงจรดังนี้

## 2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz (433MHz Sine Generator)



ภาพที่ 10 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน 433MHz Sine Generator)

วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์เป็นวงจรที่ให้เอาท์พุทของวงจรเป็นสัญญาณคลื่นไซน์โดยไม่ต้องการอินพุทใดๆ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้หยิบเครื่องมือภายใน Simulink มาใช้งานโดยตรง โดยมีชื่อและหน้าตาดังภาพที่ 11



Sine Wave

ภาพที่ 11 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีให้ใช้ใน Simulink อยู่แล้ว

โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดภายในวงจรดังนี้

- Amplitude คือค่ายอดของสัญญาณ มีหน่วยเป็น โวลต์ (Voltage)
- Bias คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณ มีหน่วยเป็น โวลต์ (Voltage)
- Frequency คือความถี่ของสัญญาณ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/sec)
- Phase คือองศาเริ่มต้นของสัญญาณ มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad)

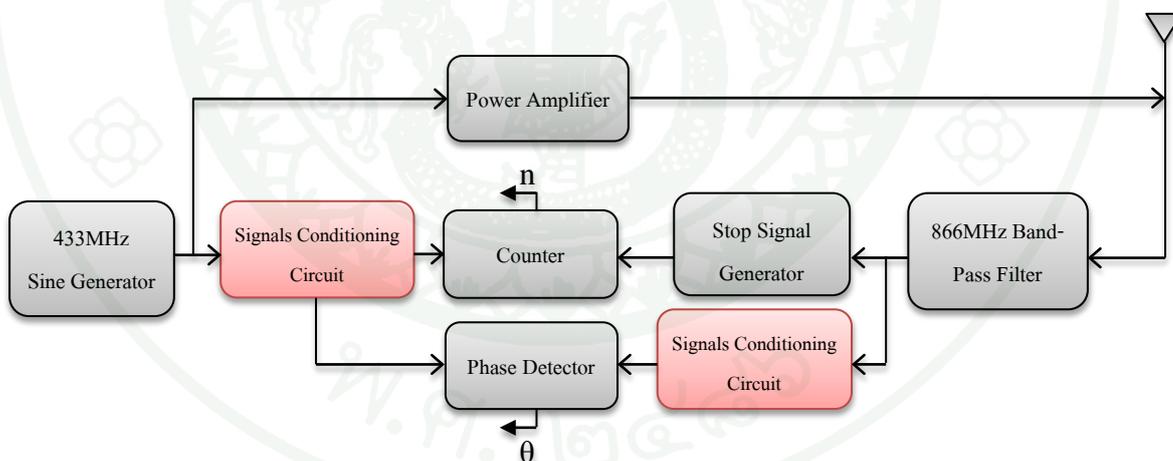
- Sample Time คือความห่างของเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้ง มีหน่วยเป็นวินาที (sec)

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการกำหนดค่าต่างๆไว้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การตั้งค่าของวงจรกำเนิดคลื่นไซน์

พารามิเตอร์	ค่า
Amplitude	1
Bias	0
Frequency	$2\pi 433e6$
Phase	0
Sample Time	$1/(500*433e6)$

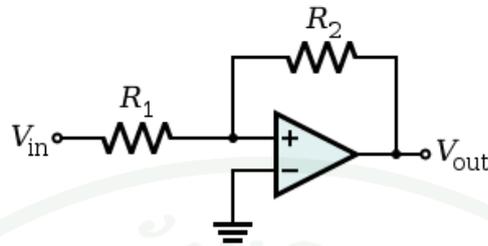
2.2 วงจรแปลงสัญญาณจากคลื่นไซน์เป็นคลื่นสี่เหลี่ยม (Signals Conditioning Circuit)



ภาพที่ 12 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Signals Conditioning Circuit)

วงจรแปลงสัญญาณในที่นี้เป็นวงจรที่มีหน้าที่แปลงสัญญาณจากคลื่นไซน์เป็นคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งวงจรที่เรานำมาใช้แปลงสัญญาณคือ วงจร Non-inverting Schmitt trigger ซึ่งมี

คุณสมบัติหลักๆคือสามารถกำหนดค่าแรงดันระดับอ้างอิงได้ทั้งแรงดันระดับอ้างอิงบนและแรงดันระดับอ้างอิงล่าง โดยมีรูปวงจรดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ภาพวงจร Non-inverting Schmitt trigger

ที่มา: Otto (1938)

ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณตามสมการด้านล่าง

$$V_{TH} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right) V_s$$

และ

$$V_{TL} = -\left(\frac{R_1}{R_2}\right) V_s$$

โดยที่

$V_{TH}$  คือ ระดับแรงดันอ้างอิงบน (โวลต์)

$V_{TL}$  คือ ระดับแรงดันอ้างอิงล่าง (โวลต์)

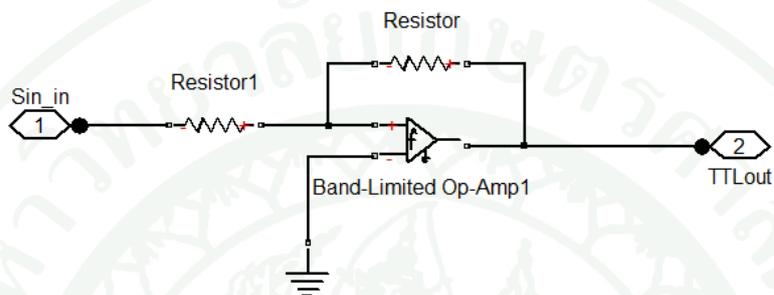
$V_s$  คือ ค่าแรงดันอินพุท (โวลต์)

ในการทดลองครั้งนี้เราได้ทำการกำหนดค่า  $|V_s| = 1$ ,  $|V_{TH}| = |V_{TL}| = 5mV$  และทำการกำหนดค่า  $R_1 = 1 k\Omega$  และสามารถหาค่าของ  $R_2$  ได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{1 - V_{TH}}{V_{TH}} R_1$$

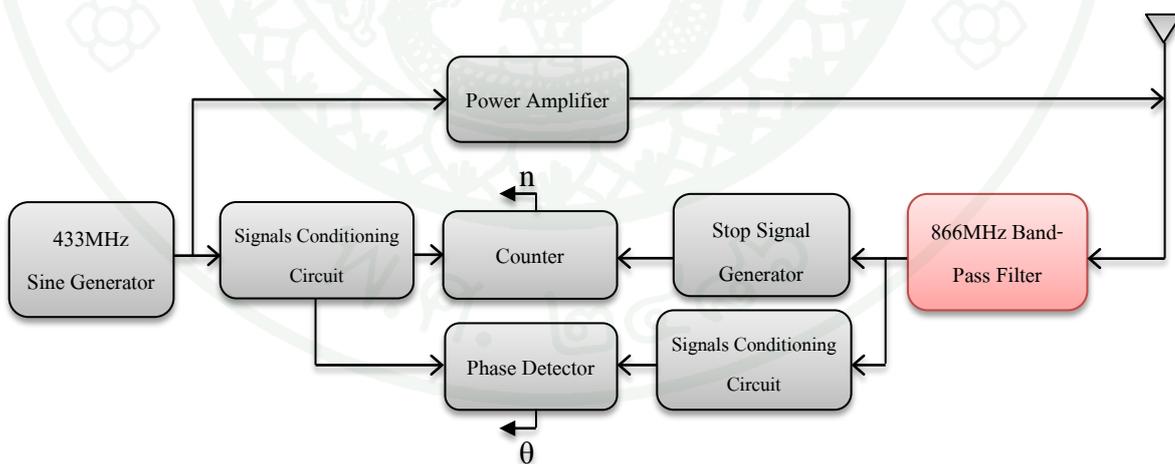
ซึ่งจะได้ค่า  $R_2$  มีค่าเท่ากับ  $199\text{ k}\Omega$

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้วงจร Schmitt trigger ในการแปลงสัญญาณนั้นจะส่งผลให้เกิด dead time ของสัญญาณขึ้น แต่ค่าของ duty cycle จะยังคงเท่าเดิมอยู่ (ถ้าหากเรากำหนดให้  $|V_{TH}| = |V_{TL}|$ ) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ในขั้นตอนของการปรับแต่งสัญญาณ (calibration) และเมื่อนำวงจรข้างต้นไปสร้างบน Simulink แล้ว จะได้วงจรในภาพที่ 14



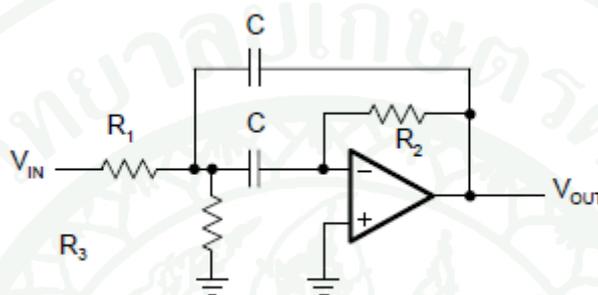
ภาพที่ 14 ภาพวงจร Non-inverting Schmitt trigger บน Simulink

2.3 วงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz (866MHz Band-Pass Filter)



ภาพที่ 15 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)

เป็นวงจรที่ใช้กรองสัญญาณความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการ โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีเพียงความถี่เท่านั้นคือ 866MHz ซึ่งวงจรที่นำมาใช้งานในการทดลองนี้เป็นวงจร Second-Order Band-Pass Filter แบบ Multiple Feedback Topology (หรือเรียกว่า Second-Order MBF Band-Pass Filter) ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถปรับค่า  $A_m$  (ค่าอัตราขยายที่ความถี่กลาง) และค่า  $f_m$  (ค่าความถี่กลาง) ได้โดยอิสระต่อกัน รวมถึงยังให้ค่า  $Q$  และ  $A_m$  ที่สูงอีกด้วย โดยมีรูปแบบของวงจรดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ภาพวงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter

ที่มา: Kugelstadt (2009)

โดยมี Transfer function ดังนี้

$$A(s) = \frac{-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \cdot \omega_m \cdot s}{1 + \frac{2R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_m \cdot s + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^2 \cdot \omega_m^2 \cdot s^2}$$

โดยที่

$\omega_m$  คือ ค่าความถี่กลางเชิงมุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\pi f_m$

มีสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆดังนี้

ค่าความถี่กลาง	$f_m = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}$
อัตราขยายที่ความถี่กลาง	$A_m = -\frac{R_2}{2R_1}$
คุณภาพวงจรกรอง	$Q = \pi f_m R_2 C$
ความกว้างแถบสัญญาณ	$B = \frac{1}{\pi R_2 C}$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาความสัมพันธ์เพิ่มเติมได้ว่า

$$A_m = -2Q^2$$

และสามารถหาค่าของ  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  ได้โดย

$$R_2 = \frac{Q}{\pi f_m C}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{-2A_m}$$

$$R_3 = \frac{-A_m R_1}{2Q^2 + A_m}$$

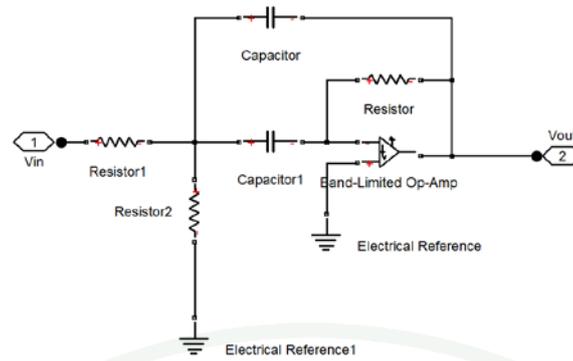
ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆของวงจรกรองไว้ดังนี้  
 $A_m = 10 \text{ dB}$ ,  $Q = 500$  และ  $C = 0.1 \text{ pF}$  และสามารถหาค่า  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  ได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{Q}{\pi f_m C} = \frac{500}{\pi \cdot 866 \times 10^6 \cdot 0.1 \times 10^{-12}} = 1.838 \text{ M}\Omega$$

$$R_1 = \frac{1.838 \times 10^6}{-2 \cdot (-10)} = 91.891 \text{ k}\Omega$$

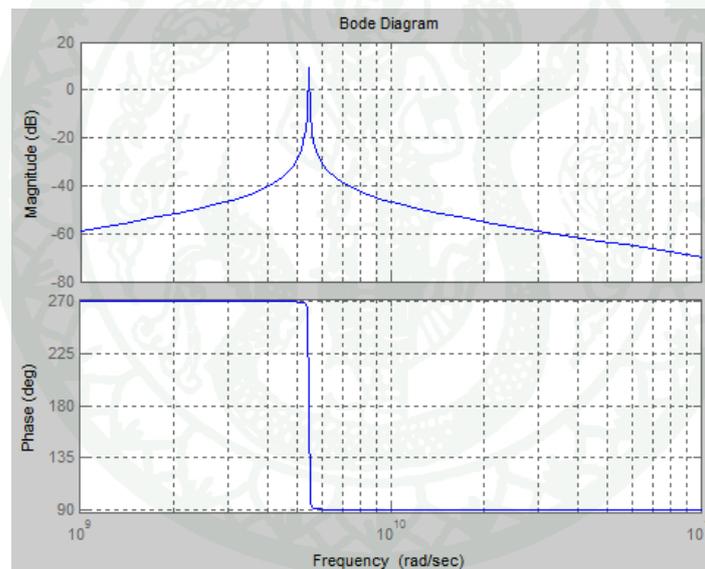
$$R_3 = \frac{-(-10) \cdot 91.891 \times 10^3}{2 \cdot 500^2 + (-10)} = 1.838 \text{ }\Omega$$

ซึ่งจะนำค่า  $C, R_1, R_2$  และ  $R_3$  ที่ได้ นำไปสร้างวงจรบน Simulink ต่อไป ซึ่งได้แสดงอยู่ในภาพที่ 17



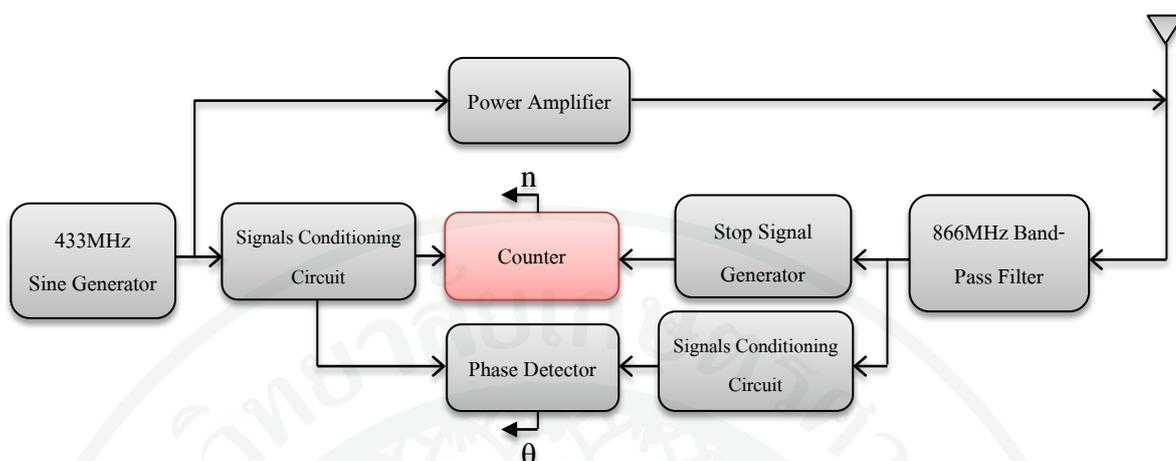
ภาพที่ 17 ภาพวงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter บน Simulink

และเมื่อนำค่าต่างๆไปแทนในวงจรแล้ว ได้ทำการทดลองหา Bode plot ของ transfer function จะได้ตามภาพที่ 18



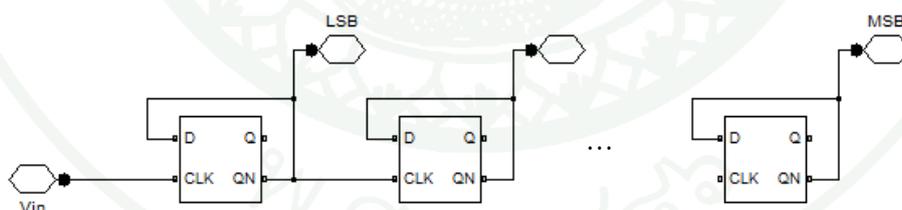
ภาพที่ 18 Bode plot ของ วงจรกรองชนิด Second-Order MBF Band-Pass Filter ที่ใช้ในการทดลอง

## 2.4 วงจรนับ ขนาด 8 บิต (Counter)



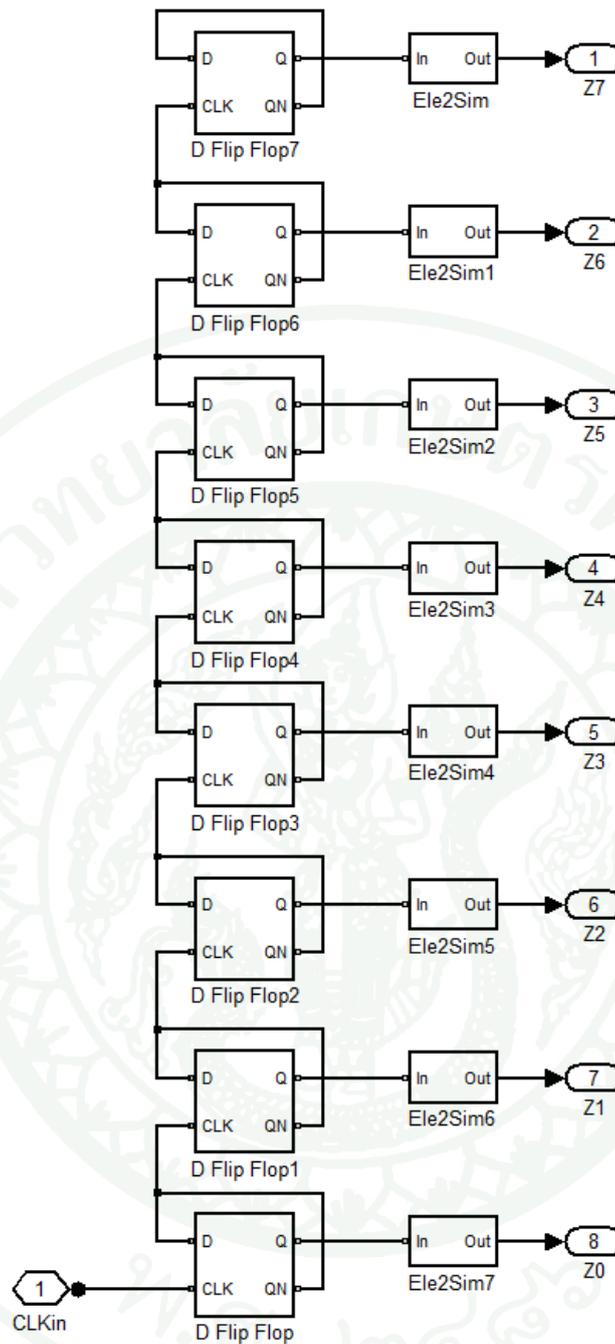
ภาพที่ 19 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Counter)

วงจรรันที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกวงจรรันแบบ อะซิงโครนัส ซึ่งเป็นวงจรรันแบบที่ไม่ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาภายนอกในการทำงาน โดยอาศัยสัญญาณที่เราต้องการนับเป็นสัญญาณนาฬิกาให้แก่วงจรรันโดยตรง และโดยปกติแล้ววงจรรันชนิดนี้มักจะนิยมสร้างกันด้วย D Flip-Flop ซึ่งนำมาต่อเรียงกัน โดยที่จำนวนบิตของวงจรรันนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ D Flip-Flop ที่ใช้ โดยมีรายละเอียดการต่อใช้งานดังภาพที่ 20



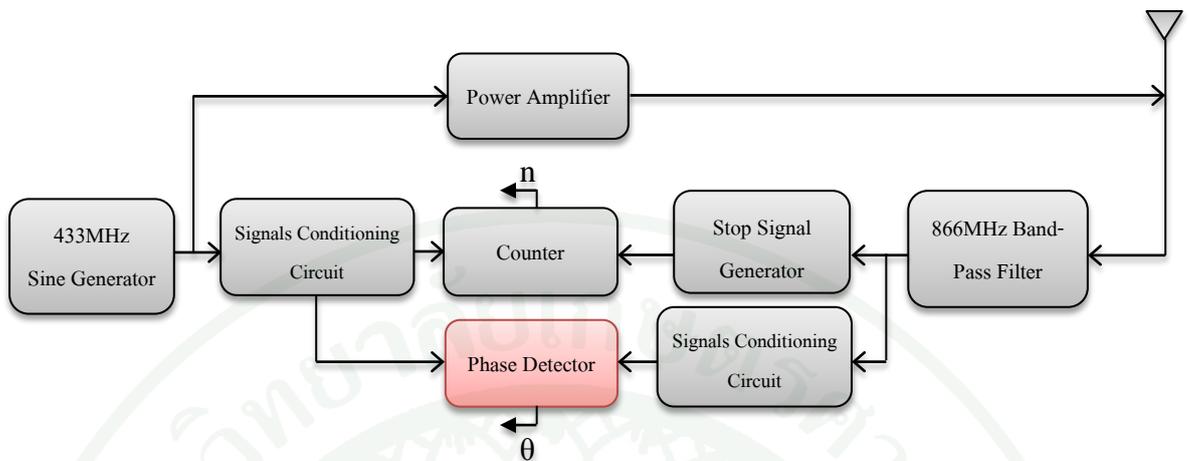
ภาพที่ 20 วิธีการนำ D Flip-Flop มาต่อเป็นวงจรรัน

และในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้วงจรรันทั้งหมด 8 บิต ด้วยกัน ซึ่งเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรัน Simulink แล้วจะได้รูปวงจรรันตามภาพที่ 21



ภาพที่ 21 วงจรนับขนาด 8 บิต บน Simulink

## 2.5 วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส (Phase Detector)



ภาพที่ 22 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Phase Detector)

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสนั้นมีหลากหลายวิธี แต่หนึ่งวิธีซึ่งเป็นที่นิยมและง่ายต่อการใช้งานคือการใช้ XOR gate เป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส เนื่องจากคุณสมบัติหนึ่งของ XOR gate คือ เมื่อใส่สัญญาณอินพุตเข้าไป 2 สัญญาณ โดยที่มีความถี่เท่ากันแต่เฟสของสัญญาณไม่เท่ากัน จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีค่า duty ratio ที่ขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนเฟสของสัญญาณอินพุตทั้ง 2 แต่การหาค่า duty ratio ของสัญญาณความถี่สูงนั้นทำได้ยาก จึงทำการหาค่า duty ratio ของสัญญาณเอาต์พุตผ่านองค์ประกอบไฟตรง (DC component) ของสัญญาณ ซึ่งหมายความว่าไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเร็วสูงในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส และเนื่องจากจำเป็นต้องหาค่าองค์ประกอบไฟตรงจึงต้องมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกรองสัญญาณให้เหลือเพียงแคงค์ประกอบไฟตรงเท่านั้น โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้งานจะเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด RC หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า First-Order RC Low-Pass Filter นั่นเอง ซึ่งการออกแบบวงจรกรองนี้จะเป็นไปตามสมการด้านล่าง

$$2\pi f_c = \frac{1}{RC}$$

โดย

$f_c$  คือ ความถี่ตัดออก (Cut-off frequency)

ในการทดลองครั้งนี้เราได้ทำการเลือกความถี่ตัดออกอยู่ที่ 125 MHz เนื่องจากไม่ต้องการค่าคงที่เวลา (time constant) มีค่าสูงจนเกินไป และยังส่งผลให้วงจรของเราเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ได้เร็วอีกด้วย โดยสามารถหาค่าคงที่เวลาได้จากผลคูณของ R กับ C ( $\tau = RC$ ) โดยค่า R กับ C สามารถหาได้ดังนี้

กำหนดให้  $C = 1\text{pF}$  จะได้ว่า

$$R = \frac{1}{2\pi f_c \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 125 \times 10^6 \cdot 1 \times 10^{-12}} = 1.27 \text{ k}\Omega$$

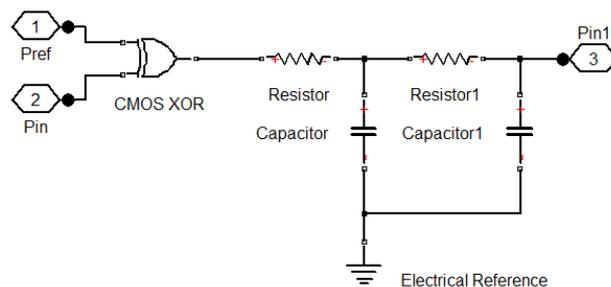
และ

$$\tau = 1.27 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-12} = 1.27 \text{ ns}$$

นั่นหมายความว่า วงจรของเราต้องใช้เวลาอย่างน้อย มากกว่า 2.54ns จึงจะสามารถนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปใช้งาน

แต่เนื่องจากความถี่ตัดออกของวงจรกรองที่ใช้งานนั้นอยู่ใกล้กับความถี่สัญญาณพาหะมากเกินไป (ไม่เกิน 1 decade) ทำให้คุณภาพของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ไม่ดีไม่เท่าที่ควร คือมีค่ารบกวน (ripple) ของสัญญาณเอาต์พุตที่สูง จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มวงจรกรองแบบเดียวกันโดยมีความถี่ตัดออกที่เท่ากัน ทำการต่อเพิ่มเข้าไปแบบ cascade ซึ่งจะทำให้ order ของวงจรกรองนั้นเพิ่มเป็น 2 มีผลทำให้ความคมหรือคุณภาพของวงจรกรองนั้นมีความมากขึ้นเช่นกัน

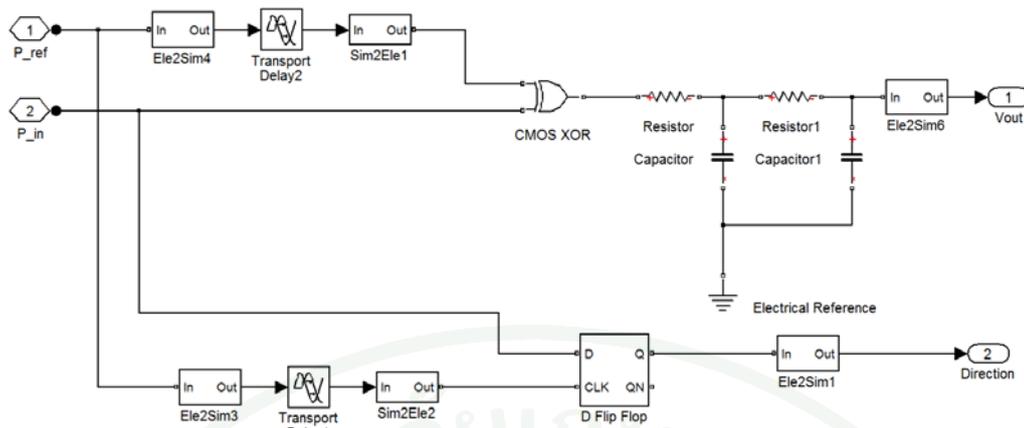
และเมื่อนำวงจรกรองมาต่อเข้ากับ XOR gate แล้ว จะได้อะไรที่นำไปสร้างบน Simulink ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสพร้อม Second-Order RC Low-Pass Filter บน Simulink

แต่เนื่องจากว่า เอาท์พุทของวงจรในภาพที่ 23 นั้น สามารถบอกความคลาดเคลื่อนเฟสได้แค่  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  เท่านั้น โดยค่าเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าตั้งแต่  $0V$  ถึง  $1V$  ตามลำดับ และเมื่อความคลาดเคลื่อนเฟสเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง  $180^\circ$  ถึง  $360^\circ$  ก็จะได้เอาท์พุทตั้งแต่  $1V$  ถึง  $0V$  ตามลำดับเช่นกัน ทำให้เราไม่สามารถทราบได้ว่าความคลาดเคลื่อนเฟสที่แท้จริงนั้นมีค่าเป็นเท่าใด ตัวอย่างเช่น เมื่อได้ค่าเอาท์พุท  $0.5V$  จะไม่สามารถบอกได้ว่า ความคลาดเคลื่อนเฟสที่แท้จริงนั้นมีค่าเป็น  $90^\circ$  หรือ  $270^\circ$  เป็นต้น

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นเข้ามาช่วยหาว่า ขณะนี้วงจรวัดความคลาดเคลื่อนเฟสนั้นทำงานอยู่ในช่วงมุมคลาดเคลื่อนที่มากกว่าหรือน้อยกว่า  $180^\circ$  หรือไม่ ซึ่งก็มีหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการใช้ D Flip-Flop เข้ามาช่วย โดยการนำสัญญาณส่งออกมาเป็นอินพุทขาสัญญาณนาฬิกาให้กับ D Flip-Flop และนำสัญญาณตอบกลับมาเป็นอินพุทให้กับขา D ของ D Flip-Flop ซึ่งมีขาสัญญาณ Q ของ D Flip-Flop เป็นเอาท์พุทของวงจร และจะได้ผลลัพธ์ดังนี้ เมื่อความคลาดเคลื่อนเฟสมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า  $180^\circ$  ค่าเอาท์พุทจาก D Flip-Flop ที่ได้จะมีค่าเป็น  $0V$  และจะมีค่าเป็น  $1V$  เมื่อความคลาดเคลื่อนเฟสอยู่ในช่วงมากกว่า  $180^\circ$  และเมื่อรวมส่วนต่างๆของวงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสเข้าด้วยกันแล้วจะได้ดังภาพที่ 24

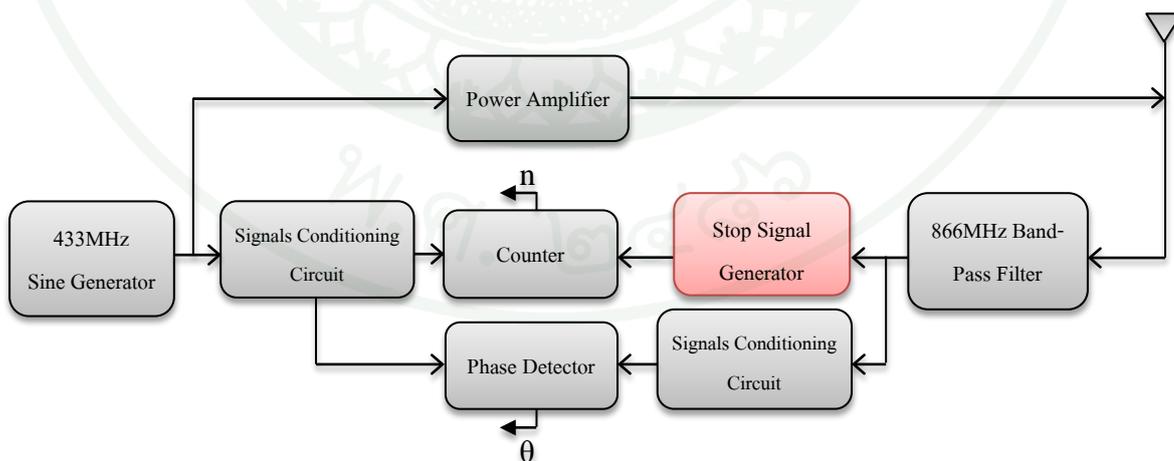


ภาพที่ 24 วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสตั้งแต่ 0° ถึง 360° บน Simulink

และเนื่องจากค่าความหน่วงเวลาของแต่ละอุปกรณ์นั้นไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องใส่  
 วงจรหน่วงเวลาให้กับอุปกรณ์ที่มีการทำงานที่เร็วกว่าอุปกรณ์อื่นดังภาพที่ 24 ด้วยเช่นกัน และ  
 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนเฟส ( $\theta$ ) กับค่าองค์ประกอบไฟตรง  
 ( $V_{phase}$ ) และเอาท์พุทของ D Flip-Flop ( $D_{phase}$ ) ได้โดยสมการด้านล่าง

$$\theta = (\pi \cdot V_{phase})(1 - D_{phase}) + \pi(2 - V_{phase})D_{phase}$$

2.6 วงจรสร้างสัญญาณหยุดนับจากสัญญาณตอบกลับ (Stop Signal Generator)



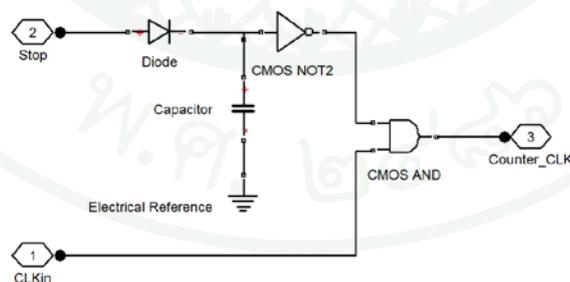
ภาพที่ 25 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Stop Signal Generator)

การสร้างสัญญาณหยุดนับเพื่อนำไปใช้สำหรับวงจรมันนั้น เราได้ใช้วิธีการกัก voltage ที่ได้จากสัญญาณตอบกลับเอาไว้ที่ตัวเก็บประจุ แต่เนื่องจากสัญญาณตอบกลับอยู่ในรูปของคลื่นไซน์จึงเกิดการคายประจุทุกครั้งเมื่อสัญญาณฝั่งลบเข้ามาถึง ดังนั้นเราจึงนำไดโอดมาใช้เพื่อป้องกันการคายประจุออกของตัวเก็บประจุ ซึ่งการทำงานของวงจรมันจะเป็นดังนี้

เมื่อเริ่มต้น ตัวเก็บประจุจะยังไม่มีประจุไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0V แต่เมื่อสัญญาณตอบกลับมาถึง ตัวเก็บประจุจะถูกอัดประจุและค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น (ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่ ค่ายอดของสัญญาณที่เข้ามาลบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด) ซึ่งเราสามารถนำแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้ไปใช้ในการหยุดนับได้

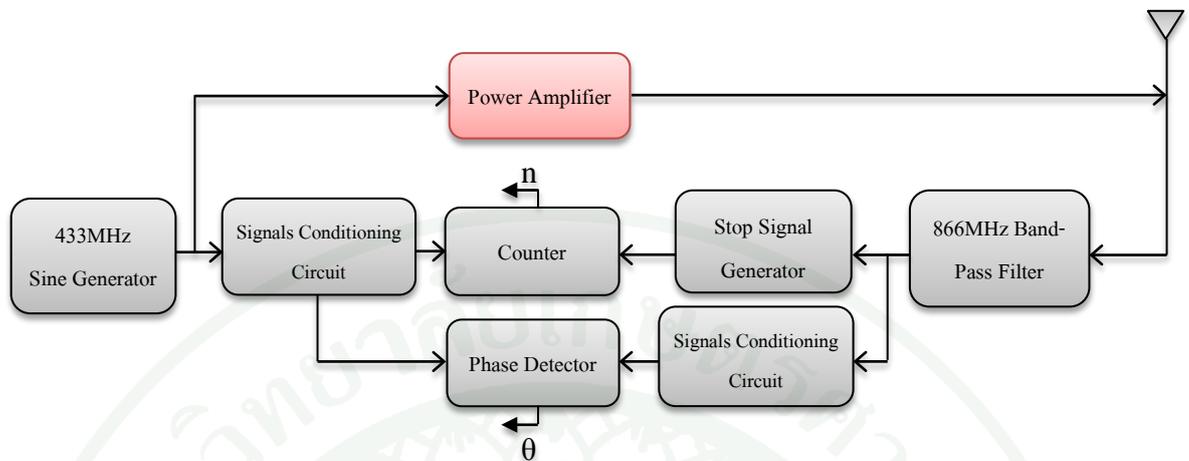
แต่การนำแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้ไปใช้นั้น ต้องคำนึงถึงการคายประจุออกเช่นกัน ในขั้นตอนนี้เราจึงใช้ inverter gate ต่อกับตัวเก็บประจุก่อนนำสัญญาณที่ได้ไปใช้งาน เนื่องจากวงจร CMOS ภายใน inverter gate มี input impedance ที่สูงมาก จึงทำให้ตัวเก็บประจุมีการคายประจุผ่าน inverter gate ขณะใช้งานที่น้อยมาก

ส่วนวิธีการที่จะทำให้วงจรมันหยุดนับได้นั้น สามารถทำได้โดยนำเอาที่พุทที่ได้จาก inverter gate มาทำการ AND กับสัญญาณนาฬิกา (ในที่นี้คือสัญญาณส่งออก) ที่จะเข้าสู่วงจรมัน แล้วจึงนำเอาที่พุทของ AND gate ไปเข้าวงจรมันต่อไป ซึ่งรายละเอียดของวงจรมันจะเป็นไปตามภาพที่ 26 โดยใช้ค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุอยู่ที่ 1 pF



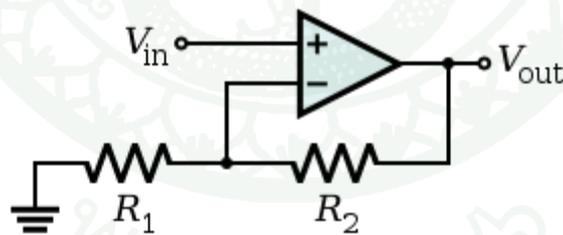
ภาพที่ 26 วงจรสร้างสัญญาณหยุดนับจากสัญญาณตอบกลับบน Simulink

## 2.7 วงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก (Power Amplifier)



ภาพที่ 27 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ (เลือกเฉพาะส่วน Power Amplifier)

วงจขยายที่ใช้นั้นจะเป็นวงจร non-inverting amplifier (วงจรตามภาพที่ 28) โดยกำหนดให้กำลังงานของสัญญาณส่งออกอยู่ที่ 0dB ซึ่งในที่นี้เราวงจรกำเนิดคลื่นไซน์ที่ค่ายอดแรงดัน (Amplitude) อยู่ที่ 1V และมีวิธีการหาอัตราขยายของวงจร ที่ทำให้ได้กำลังงานของสัญญาณส่งออกเท่ากับ 0dB ดังนี้



ภาพที่ 28 วงจร Non-Inverting Amplifier

ที่มา: Delton (1994)

สมการสัมพันธ์ของวงจรขยายแบบ non-inverting amplifier

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

โดยที่

$A_v$  คือ อัตราขยายของวงจร non-inverting amplifier

$V_{out}$  คือ output ของวงจร

$V_{in}$  คือ input ของวงจร

เมื่อกำหนดค่ากำลังงานของสัญญาณส่งออกมีค่าเท่ากับ 0dB นั้นหมายความว่าค่า amplitude ของเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ

$$0 \text{ dB} = 1 \text{ W} = \frac{V_{out}^2}{2}$$

$$V_{out} = \sqrt{2 \cdot 1} = 1.414 \text{ V}$$

และสามารถหาอัตราขยายของวงจรได้โดย

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1.414}{1} = 1.414$$

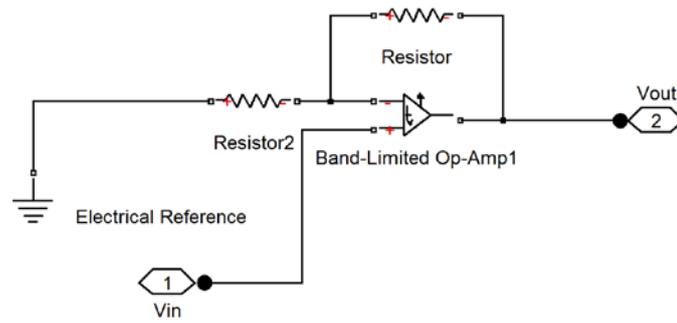
แต่เนื่องจากว่า input impedance ของวงจร non-inverting amplifier นั้นขึ้นอยู่กับค่าของ  $R_1$  ดังนั้นเราจึงเลือกค่า  $R_1$  ให้มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  และสามารถหาค่าของ  $R_2$  ได้ดังนี้

$$1.414 = \left(1 + \frac{R_2}{10 \times 10^3}\right)$$

$$R_2 = 10 \times 10^3(1.414 - 1) = 4.14 \times 10^3 = 4.14 \text{ k}\Omega$$

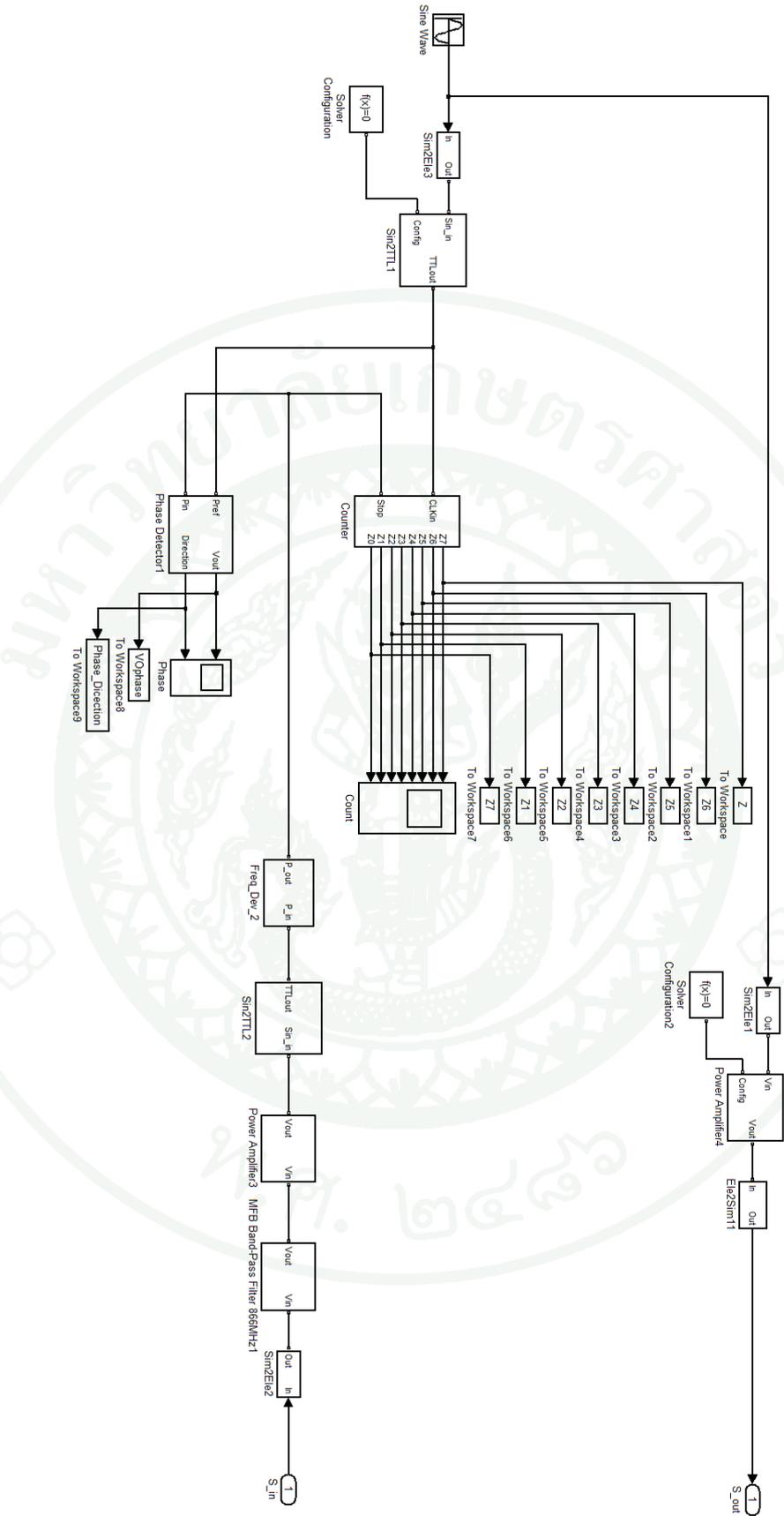
เมื่อนำค่าต่างๆไปแทนค่าในวงจรจะสามารถสร้างเป็นวงจรบน Simulink ได้ดัง

ภาพที่ 29



ภาพที่ 29 วงจรขยายกำลังแบบ Non-Inverting Amplifier บน Simulink

และเมื่อนำเอาวงจรที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดสำหรับอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่มารวมกัน  
จะได้วงจรบน Simulink ตามภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แบบจำลองภายในอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่บน Simulink

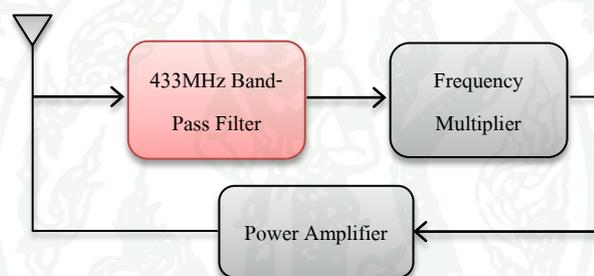
### 3. การออกแบบอุปกรณ์เป้าหมาย

จากแบบจำลองของอุปกรณ์เป้าหมายในภาพที่ 8 สามารถเรียบเรียงวงจรภายในได้ดังนี้

1. วงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลาง 433 MHz (433MHz Band-Pass Filter)
2. วงจรคูณความถี่ 2 เท่า (Frequency Multiplier)
3. วงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก (Power Amplifier)

ซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบของแต่ละวงจรดังนี้

#### 3.1 วงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 433 MHz (Band-Pass Filter)



ภาพที่ 31 แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน 433MHz Band-Pass Filter)

ในส่วนของตัววงจรกรองมีรายละเอียดเหมือนกับวงจรกรองของอุปกรณ์ที่ตั้งอยู่  
กับที่ทั้งหมดคือใช้ Second-Order MBF Band-Pass Filter เช่นเดียวกัน แต่ได้เปลี่ยนค่า  
สัมประสิทธิ์ต่างๆดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การตั้งค่าของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 433 MHz

พารามิเตอร์	ค่า
$f_c$	433 MHz
$A_m$	10 dB
$Q$	1000
$c$	0.1 pF

และสามารถหาค่า  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  ได้ดังนี้

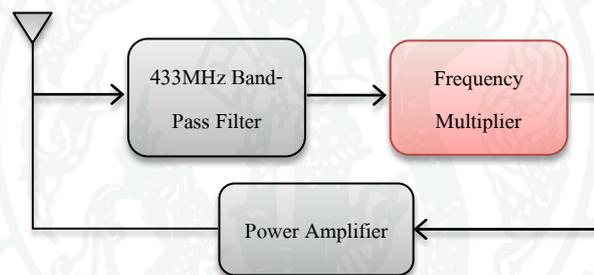
$$R_2 = \frac{Q}{\pi f_m C} = \frac{1000}{\pi \cdot 433 \times 10^6 \cdot 0.1 \times 10^{-12}} = 735.13 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{735.13 \times 10^3}{-2 \cdot (-10)} = 183.78 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{-(-10) \cdot 183.78 \times 10^3}{2 \cdot 1000^2 + (-10)} = 0.1838 \text{ }\Omega$$

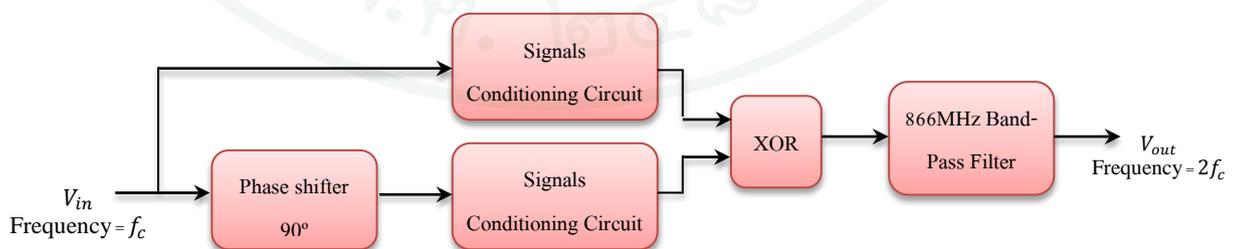
จากนั้นนำค่า  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  ที่ได้นำไปสร้างเป็นวงจรรอกความถี่ต่อไป

### 3.2 วงจรคูณความถี่ 2 เท่า (Frequency Multiplier)



ภาพที่ 32 แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน Frequency Multiplier)

ซึ่งภายในวงจรคูณความถี่ยังประกอบไปด้วยวงจรอื่นๆในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 แผนผังรูปภาพภายในวงจรคูณความถี่ 2 เท่า

การทำงานของวงจรคูณความถี่จะใช้คุณสมบัติของ XOR gate ช่วยเพิ่มความถี่ของสัญญาณให้มีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่เดิม เนื่องจากคุณสมบัติหนึ่งของ XOR gate คือเมื่อสัญญาณอินพุตทั้งสองมีความถี่เท่ากัน แต่มีความต่างเฟสกันอยู่ จะมีผลทำให้ความถี่เอาต์พุตของ XOR gate นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งค่า duty ratio ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสอง และในที่นี้เราได้ทำการเลือกความต่างเฟสของสัญญาณอยู่ที่  $90^\circ$  เนื่องจากเราต้องการสัญญาณเอาต์พุตที่ duty ratio เท่ากับ 50% ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้วงจร Phase shifter ทำการเลื่อนเฟสของสัญญาณออกไปก่อน  $90^\circ$  แล้วจึงคอยนำมา XOR กับสัญญาณที่มีเฟส  $0^\circ$  ซึ่งจะทำให้เราได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่เป็น 2 เท่า และมีค่า duty ratio อยู่ที่ 50% ตามที่เราต้องการ

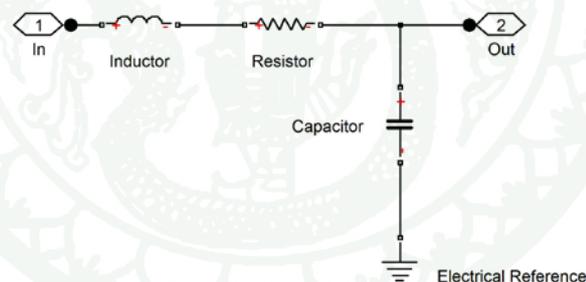
แต่ XOR gate นั้นต้องการสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของคลื่นสี่เหลี่ยม แต่สัญญาณที่ได้มาจากวงจรกรองก่อนหน้านี้อยู่ในรูปแบบของคลื่นไซน์ ทำให้เราต้องแปลงสัญญาณด้วยวงจรแปลงสัญญาณจากคลื่นไซน์เป็นคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีรายละเอียดเหมือนกับวงจรภาพที่ 14 ทุกประการ

และจากความต้องการให้สัญญาณเอาต์พุตของ XOR gate นั้นเป็นแบบคลื่นไซน์ แต่ว่าอุปกรณ์ XOR gate นั้นจะให้สัญญาณเอาต์พุตแบบคลื่นสี่เหลี่ยม ทำให้เราต้องทำการแปลงสัญญาณ โดยใช้ Band-Pass Filter ที่ความถี่กลางเท่ากับ 2 เท่าของความถี่สัญญาณพาหะ (ในที่นี้เท่ากับ 866MHz) เพื่อทำการกรององค์ประกอบทางความถี่ ที่เป็นฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณออก ซึ่งเราจะได้สัญญาณคลื่นไซน์ตามที่เราต้องการ โดยวงจรกรองความถี่ที่ใช้นั้นจะเป็นวงจร Second-Order MBF Band-Pass Filter ซึ่งมีรายละเอียดเหมือนกับวงจรกรองในภาพที่ 17 และมีการตั้งค่าของต่างๆตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การตั้งค่าของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกส์ออกจากสัญญาณที่ต้องการ

พารามิเตอร์	ค่า
$f_c$	866 MHz
$A_m$	10 dB
$Q$	500
$C$	0.1 pF
$R_2$	1.838 M $\Omega$
$R_1$	91.891 k $\Omega$
$R_3$	1.838 $\Omega$

ส่วนวงจร Phase shifter ที่นำมาใช้นั้น เราจะใช้คุณสมบัติของวงจร RLC เป็นหลักในการทำงาน เนื่องจากการตอบสนองทางความถี่ของวงจร RLC นั้นจะมีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของเฟสขึ้น โดยมีรายละเอียดวงจรตามภาพที่ 35



ภาพที่ 34 วงจร Phase shifter บน Simulink

และมี Transfer function ดังนี้

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

เนื่องจากเราต้องการให้เกิดการคลาดเคลื่อนเฟส  $90^\circ$  ที่ความถี่ 433 MHz จึงต้องคำนวณค่า R, L และ C ดังนี้

พิจารณาส่วนของ denominator ใน transfer function และออกแบบให้ได้ double pole ที่ความถี่เชิงมุมที่ต้องการ

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0$$

ต้องการ double pole ที่  $\omega_c$

$$s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2 = 0$$

เทียบสมการทั้ง 2 จะได้ว่า

$$2\omega_c = \frac{R}{L}$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{LC}$$

แทนค่า  $\omega_c = 2\pi f_c = 2\pi(433 \times 10^6)$  และกำหนดค่า  $L = 1 \mu H$  จะได้

$$R = 2\omega_c L = 2 \cdot (2\pi(433 \times 10^6)) \cdot (1 \times 10^{-6}) = 5.441 \times 10^3$$

$$R = 5.441 \text{ k}\Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega_c^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi(433 \times 10^6))^2 \cdot (1 \times 10^{-6})} = 1.351 \times 10^{-13}$$

$$C = 0.1351 \text{ pF}$$

แต่ที่ double pole นั้น ค่าของ amplitude ของสัญญาณจะถูกลดทอนไป -6 dB ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายแรงดันชนิด non-inverting amplifier มาช่วยขยายแรงดันเพิ่มอีก 6 dB มีผลทำให้อัตราขยายรวมทั้งวงจร phase shifter นี้มีค่าเท่ากับ 0 dB นั่นเอง โดยมีวิธีการในการคำนวณค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ของวงจร non-inverting ดังนี้

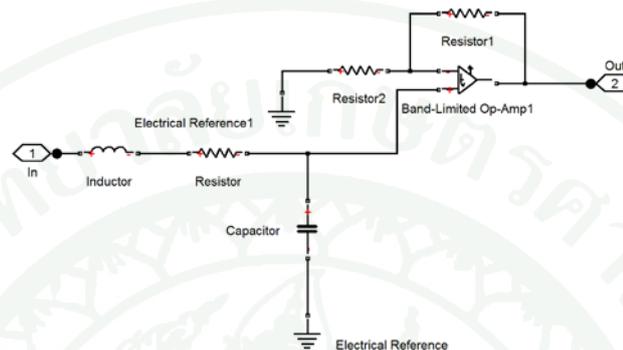
$$A_v = 6 \text{ dB} = 1.995 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

เลือก  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$  จะได้ว่า

$$R_2 = (1.995 - 1)R_1 = (1.995 - 1) \cdot 1 \times 10^6$$

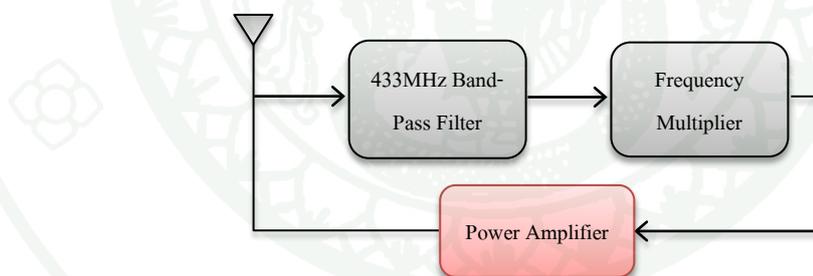
$$R_2 = 995.26 \text{ k}\Omega$$

และเมื่อรวมวงจรทั้งหมดและนำไปสร้างเป็นเป็นวงจร Phase shifter บน Simulink แล้วจะได้วงจรตามภาพที่ 35



ภาพที่ 35 วงจร Phase shifter พร้อมวงจรขยายแรงดัน บน Simulink

### 3.3 วงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก (Power Amplifier)



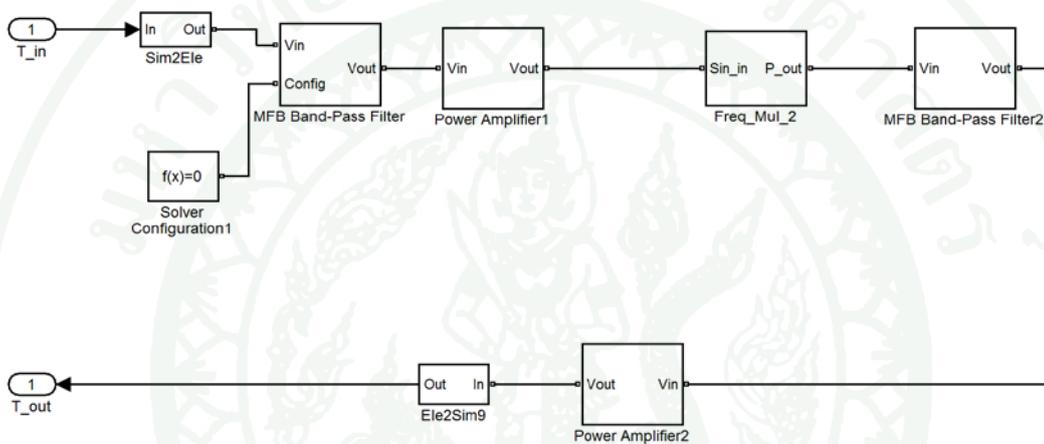
ภาพที่ 36 แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมาย (เลือกเฉพาะส่วน Power Amplifier)

ในส่วนนี้รายละเอียดของวงจรจะเหมือนกับวงจรในภาพที่ 29 ทุกประการ โดยมีการตั้งค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความต้านทานที่ในวงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออกในอุปกรณ์เป้าหมาย

พารามิเตอร์	ค่า
$R_1$	1 k $\Omega$
$R_2$	80 k $\Omega$

และเมื่อนำเอาวงจรที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดสำหรับอุปกรณ์เป้าหมายมารวมกัน จะได้  
 วงจรบน Simulink ตามภาพที่ 37



ภาพที่ 37 แบบจำลองภายในอุปกรณ์เป้าหมายบน Simulink

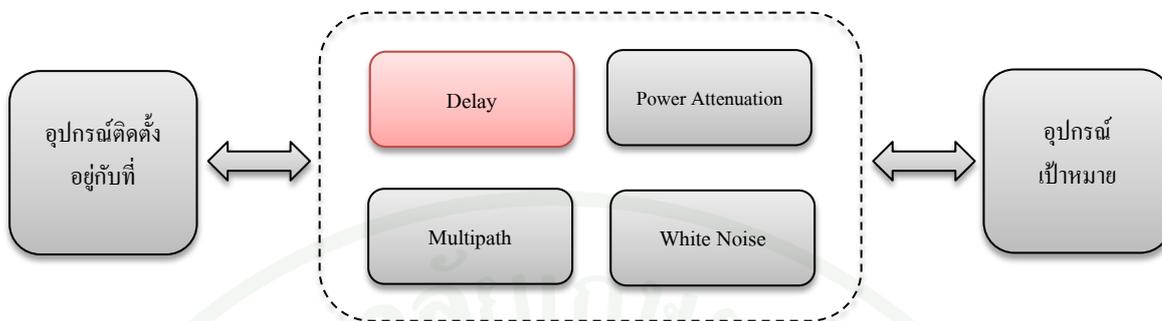
**4. แบบจำลองช่องสัญญาณในการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF Transmission Model)**

จากแบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณในภาพที่ 9 สามารถเรียบเรียง  
 อุปกรณ์ภายในได้ดังนี้

1. อุปกรณ์หน่วงเวลาสัญญาณตามระยะทาง (Delay)
2. อุปกรณ์ลดทอนกำลังสัญญาณตามระยะทาง (Power Attenuation)
3. อุปกรณ์สร้างสัญญาณรบกวนแบบขาว (White noise)
4. อุปกรณ์สร้างสัญญาณรบกวนชนิดหลายเส้นทาง (Multipath)

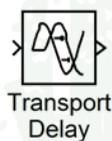
ซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

#### 4.1 อุปกรณ์หน่วงเวลาสัญญาณตามระยะทาง (Delay)



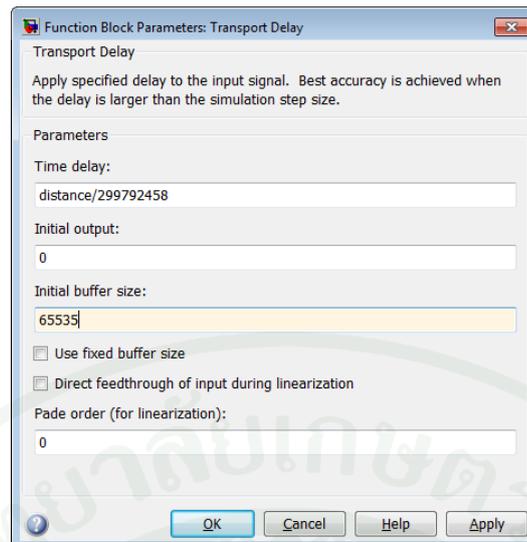
ภาพที่ 38 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Delay)

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง ดังนั้นการส่งข้อมูลด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่อมต้องมีระยะเวลาในการเดินทางของคลื่น จึงต้องทำการหน่วงเวลาสัญญาณส่งออกด้วย Transport delay ซึ่งเป็นเครื่องมือใน Simulink โดยมีหน้าตาดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 อุปกรณ์เลื่อนเวลาของสัญญาณ ที่มีให้ใช้งานบน Simulink

และมี parameter ต่างๆที่จำเป็นต้องตั้งค่างดังภาพที่ 40

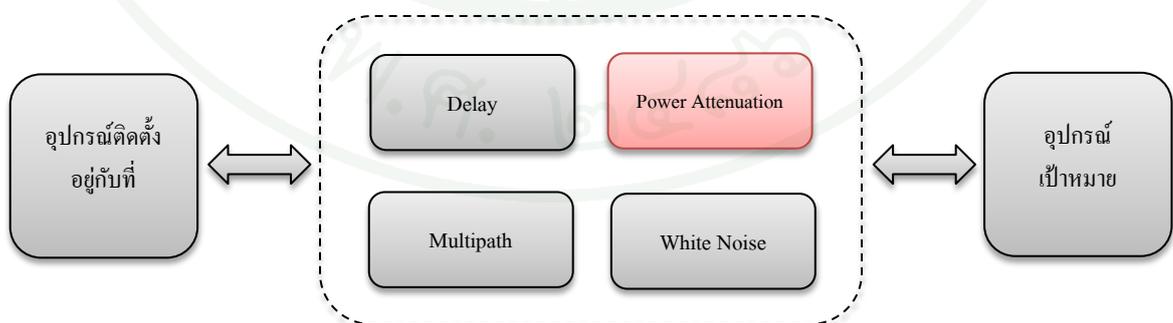


ภาพที่ 40 หน้าต่างตั้งค่าของอุปกรณ์เลื่อนเวลา

โดยที่

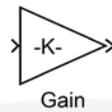
- Time delay คือ ค่าเวลาที่ต้องการหน่วงสัญญาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ระยะทาง (distance) หารด้วย ความเร็วแสง (299,792,458)
- Initial output คือ ค่าเอาต์พุตเริ่มต้นเมื่อเริ่มทำการทดลอง
- Initial buffer size คือ จำนวนช่องของหน่วยความจำที่เอาไว้เก็บข้อมูลของสัญญาณที่ถูกหน่วงออกไป

#### 4.2 อุปกรณ์ลดทอนกำลังสัญญาณตามระยะทาง (Power Attenuation)



ภาพที่ 41 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Power Attenuation)

ในการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังอากาศ กำลังงานของสัญญาณจะถูกดูดกลืนไปตามวัตถุและมวลของอากาศ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการลดทอนกำลังของสัญญาณเพื่อความเหมือนจริงในการทดลอง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้คือ Gain ใน Simulink มีหน้าตาดังภาพที่ 42



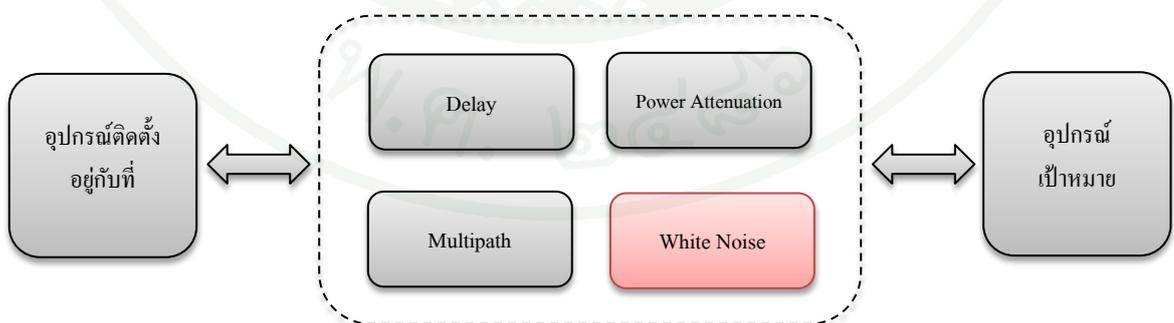
ภาพที่ 42 อุปกรณ์ตั้งค่า Gain ของสัญญาณ ที่มีให้ใช้งานบน Simulink

ซึ่งสมการที่เราจะใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกลดทอนแสดงอยู่ในสมการด้านล่าง

$$K = \sqrt{G_{TX} \cdot G_{RX}} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าหากทำการทดลองที่ระยะทาง 0 เมตร จะพบว่า อัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกลดทอนนั้นมีค่าเข้าสู่อนันต์ ซึ่งในความเป็นจริงเป็นไปได้ ดังนั้นเราจึงทำการกำหนดค่าระยะทางที่ใช้สำหรับสมการของกำลังงานที่ถูกลดทอนให้มีค่าเท่ากับ 0.06 เมตร สำหรับระยะทางจริงที่น้อยกว่า 0.06 เมตร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

#### 4.3 อุปกรณ์สร้างสัญญาณรบกวนแบบขาว (White noise)



ภาพที่ 43 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน White Noise)

ในการทำงานบนสภาพแวดล้อมจริงจะมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย เพื่อการทดลองที่สมจริงและน่าเชื่อถือมากขึ้น เราจึงทำการใส่สัญญาณรบกวนเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองนี้ด้วย ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เรานำมาใช้งานคือสัญญาณรบกวนแบบขาว (White noise) เนื่องจากเป็นสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง และมีความหนาแน่นของกำลังงานเท่ากันทุกความถี่ โดยสามารถใช้งานอุปกรณ์นี้จากเครื่องมือใน Simulink ได้เลย และมีหน้าตาตามภาพที่ 44



ภาพที่ 44 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรบกวนในรูปแบบ White noise ที่มีให้ใช้งานบน Simulink

โดยความสัมพันธ์ของกำลังงานสัญญาณรบกวนกับค่า amplitude ของสัญญาณรบกวนนั้นจะเป็นไปตามสมการด้านล่าง

$$N = \frac{Mag^2}{\omega}$$

ในการทดลองครั้งนี้เราต้องการค่า SNR ของสัญญาณส่งออกอยู่ที่ประมาณ 68 dB ซึ่งสามารถคำนวณค่า Mag ของ white noise ได้เท่ากับ

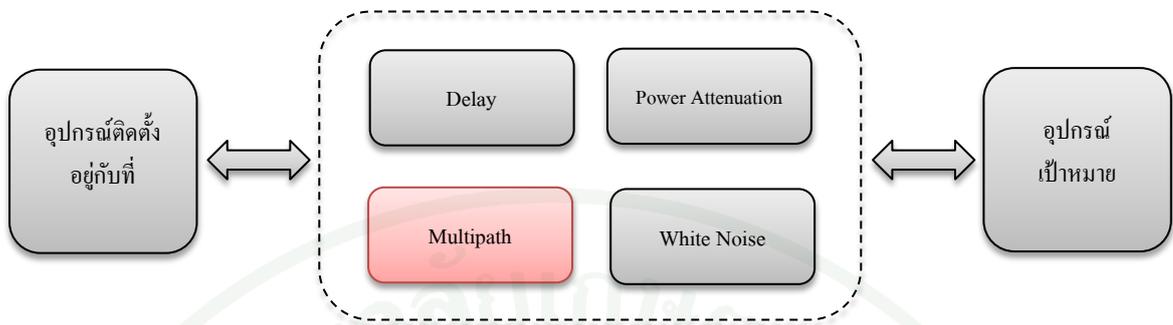
$$68 \text{ dB} = 20 \log \left( \frac{V_{signals}}{V_{noise}} \right) = 20 \log \left( \frac{1.414}{V_{noise}} \right)$$

$$V_{noise} = \frac{1.414}{\frac{68}{10^{20}}} = 0.563 \text{ mV}$$

และสามารถหาลำลังงานของสัญญาณรบกวน white noise ได้เท่ากับ

$$N = \frac{(0.563 \times 10^{-3})^2}{2\pi \cdot (433 \times 10^6)} = 0.117 \times 10^{-15}$$

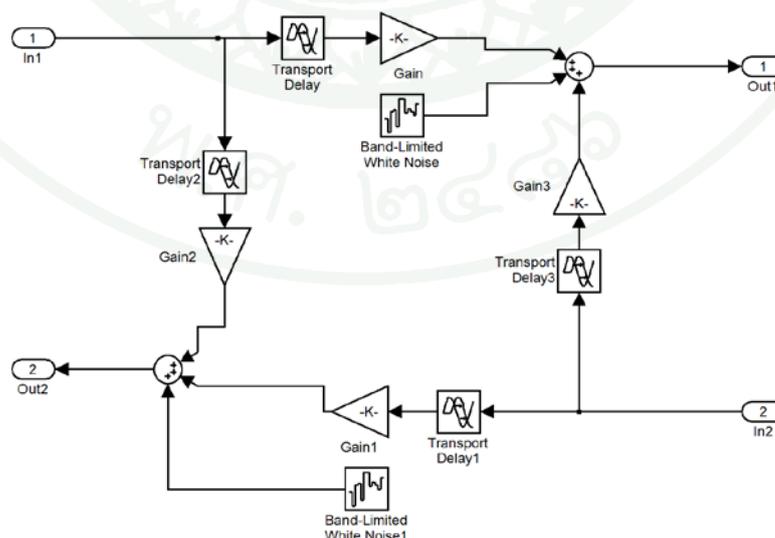
4.4 อุปกรณ์สร้างสัญญาณรบกวนชนิดหลายเส้นทาง (Multipath)



ภาพที่ 45 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (เลือกเฉพาะส่วน Multipath)

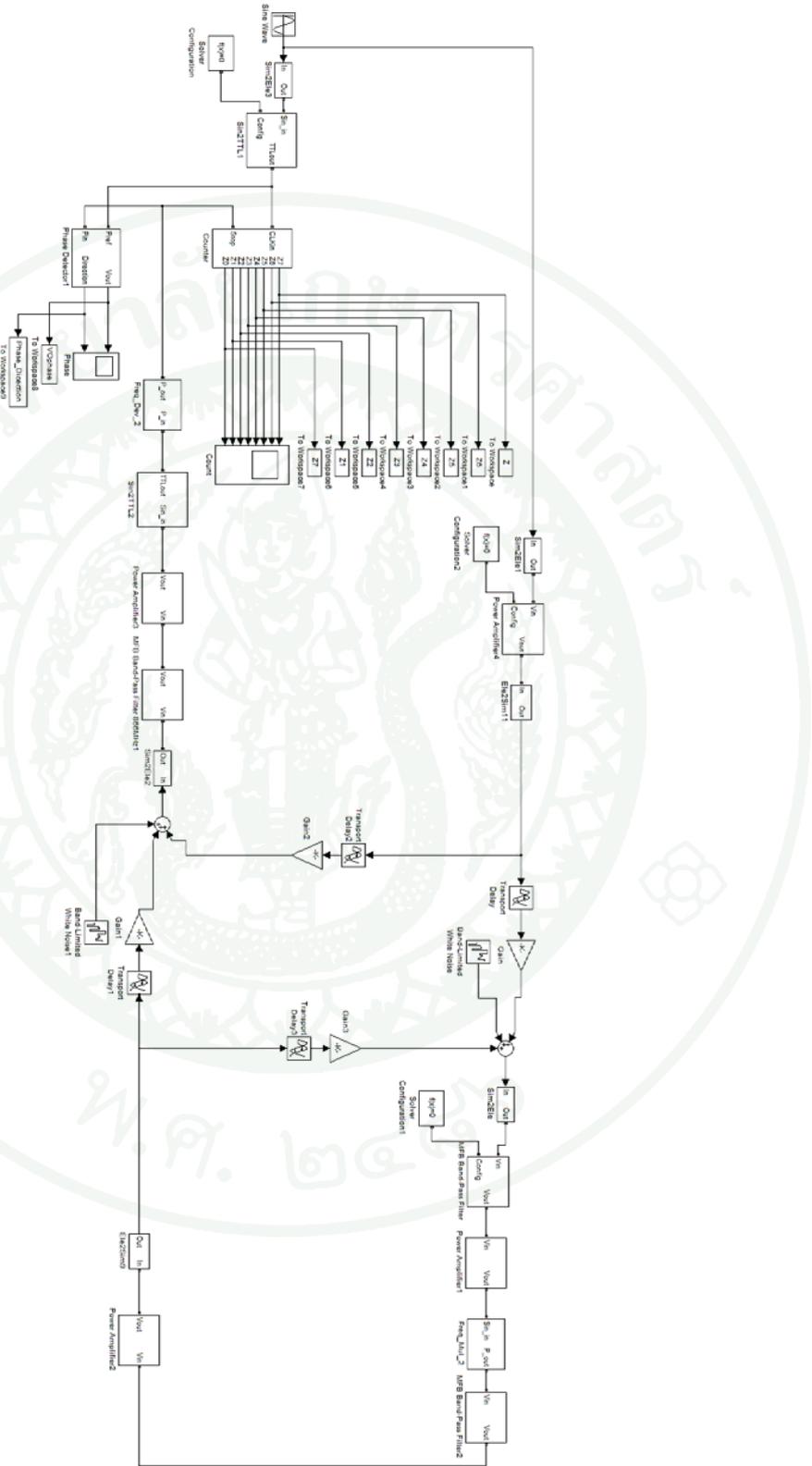
เนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริงเรายังพบสัญญาณรบกวนอีกหนึ่งรูปแบบนั่นคือสัญญาณรบกวนชนิดหลายเส้นทาง (Multipath) ซึ่งสัญญาณรบกวนชนิดนี้เกิดขึ้นจากการสะท้อนของสัญญาณกับวัตถุต่างๆ และวิธีการสร้างสัญญาณชนิดนี้เราจะใช้วิธีการป้อนสัญญาณกลับไปยังตัวอุปกรณ์ โดยระยะของวัตถุที่คลื่นจะสะท้อนนั้นเกิดจากการสุ่มโดยใช้คำสั่ง rand ซึ่งมีอยู่ใน MATLAB อยู่แล้ว

เมื่อนำเอาวงจรที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดสำหรับอุปกรณ์เป้าหมายมารวมกัน จะได้วงจรบน Simulink ตามภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

5. แบบจำลองเมื่อรวมอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 47 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองบน Simulink

## ผลและวิจารณ์

### ผล

จากแบบจำลองที่เราได้สร้างมาในขั้นต้น ได้นำมาทำการทดลองและได้สรุปผลการทดลองโดยแบ่งเป็นส่วนๆดังนี้

1. การทดลองหาผลการทำงานของวงจรต่างๆภายในแบบจำลอง
2. การทดลองหาระยะห่างระหว่างตัวอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่กับอุปกรณ์เป้าหมาย
3. การทดลองการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์เป้าหมาย

#### 1. การทดลองหาผลการทำงานของวงจรต่างๆภายในแบบจำลอง

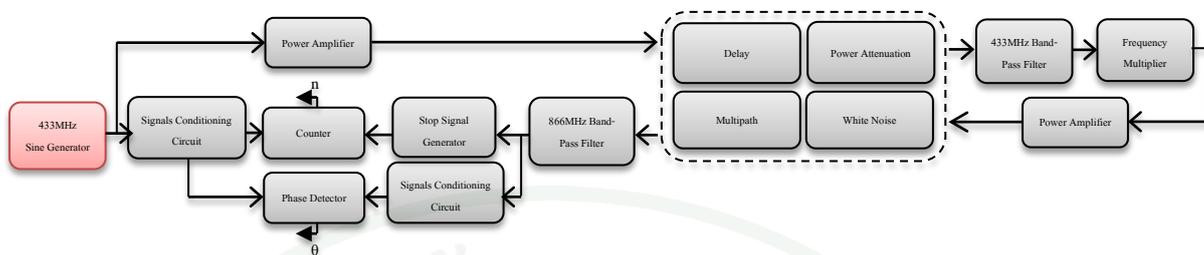
จากแบบจำลองที่ได้ เราได้ทำการทดลองหาผลของวงจรต่างๆดังนี้

1. ทดลองหาผลของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz
2. ทดลองหาผลของวงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก
3. ทดลองหาผลของการส่งสัญญาณส่งออกข้ามแบบจำลองช่องสัญญาณ
4. ทดลองหาผลของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 433 MHz
5. ทดลองหาผลของวงจรคูณความถี่ 2 เท่า และวงจรขยายกำลังสัญญาณ
6. ทดลองหาผลของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz
7. ทดลองหาผลของวงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นไซน์เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม และวงจรหารความถี่
8. ทดลองหาผลของวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ
9. ทดลองหาผลของวงจรมับ ขนาด 8 บิต
10. ทดลองหาผลของวงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส

และในการทดลองครั้งนี้เราได้กำหนดค่าต่างๆที่ต้องใช้ในตัวอุปกรณ์ไว้ดังนี้

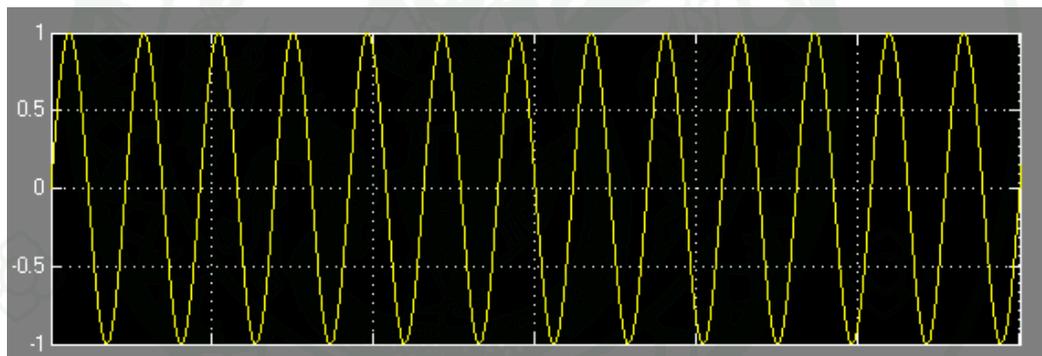
- ระยะทางที่ใช้ในการทดลอง = 1 เมตร
- Sampling rate =  $\frac{T_c}{500} = 4.62 \times 10^{-12} s$
- การตั้งค่าของ NOT gate, NAND gate, AND gate และ XOR gate
  - Low level input voltage = 0.15V
  - High level input voltage = 0.4V
  - Average input capacitance = 0.1pF
  - Low level output voltage = 0V
  - High level output voltage = 1V
  - Output resistance = 25 $\Omega$
  - Propagation delay = 0.1ns
- การตั้งค่าของ OP-AMP
  - Open-loop Gain = 2000
  - Input resistance = 1M $\Omega$
  - Output resistance = 50 $\Omega$
  - Minimum output = -1V
  - Maximum output = 1V
  - Maximum slew rate = 10kV/ $\mu s$
  - Bandwidth = 10GHz
- การตั้งค่าของเสาอากาศ
  - $G_{TX} = 1$
  - $G_{RX} = 1$

### 1.1 ทดลองหาผลของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz



ภาพที่ 48 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 433MHz Sine Generator)

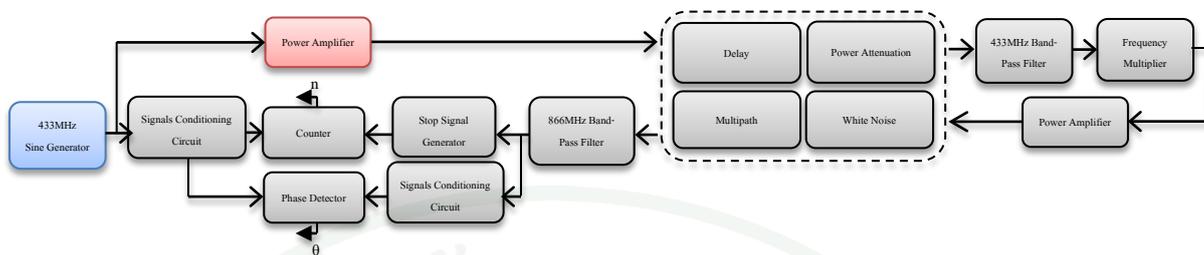
จากการทดลองเราจะได้สัญญาณเอาท์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz ตามภาพที่ 49



ภาพที่ 49 สัญญาณเอาท์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz (5ns/div)

จากสัญญาณที่ได้ทำให้เราทราบว่าวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์นั้นสามารถทำงานได้ดี โดยให้ค่า amplitude ของสัญญาณอยู่ที่ 1V และมีคาบของสัญญาณอยู่ที่ 2.309ns หรือความถี่ประมาณ 433.09MHz

1.2 ทดลองหาผลของวงจรรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก



ภาพที่ 50 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Power Amplifier)

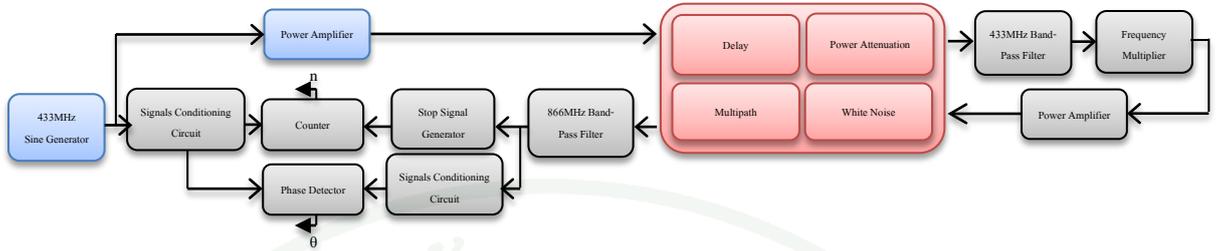
เมื่อทำการทดลองและวัดค่าของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรรขยายกำลัง จะได้ผลการทดลองดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 ผลการทดลองของวงจรรขยายกำลังสัญญาณ

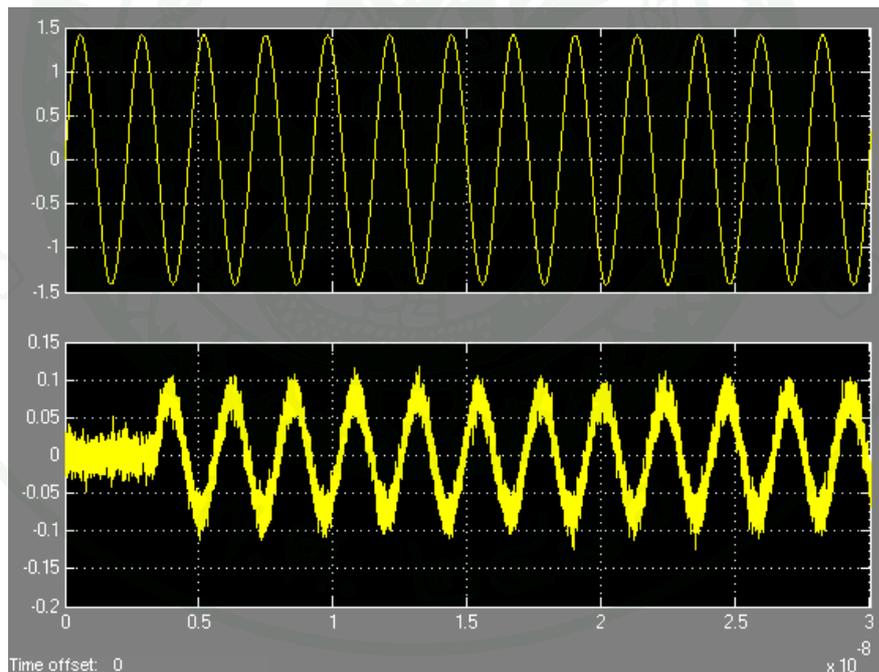
จากผลของการทดลองในภาพที่ 51 แสดงให้เห็นถึงวงจรรขยายกำลังสัญญาณสามารถทำงานได้ถูกต้อง เนื่องจากสัญญาณที่ได้มี amplitude เท่ากับ 1.413V หรือกำลังงานของสัญญาณมีค่าประมาณ -0.0172dB ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบไว้คือ 0dB และไม่ทำให้สัญญาณมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากเดิม

1.3 ทดลองหาผลของการส่งสัญญาณส่งออกข้ามแบบจำลองช่องสัญญาณ



ภาพที่ 52 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วนแบบจำลองช่องสัญญาณ)

เมื่อสัญญาณถูกส่งออกจากอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ไปสู่อุปกรณ์เป้าหมายผ่าน Transmission Model แล้ว จะได้ผลการทดลองตามภาพที่ 53

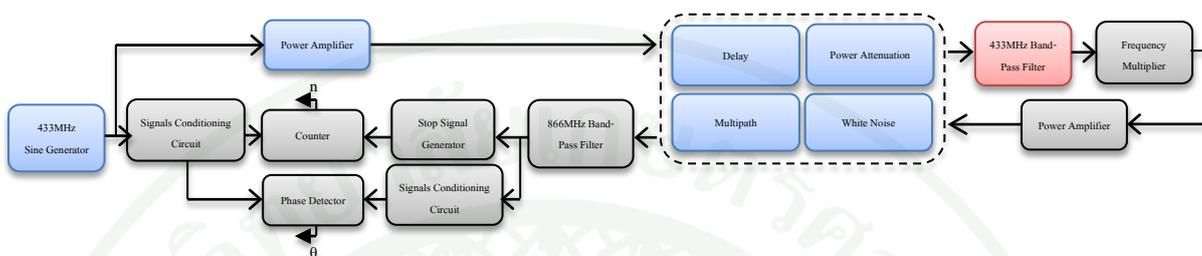


ภาพที่ 53 ผลการทดลองของช่องสัญญาณ โดยกราฟบนคือสัญญาณก่อนส่งและกราฟล่างคือสัญญาณหลังส่ง

จากภาพที่ 53 กราฟล่าง จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวนร่วมอยู่ด้วย แต่ยังคงมี SNR ที่สูง โดยยังสามารถตัดสัญญาณรบกวนออก เพื่อให้ได้สัญญาณที่เราต้องการ

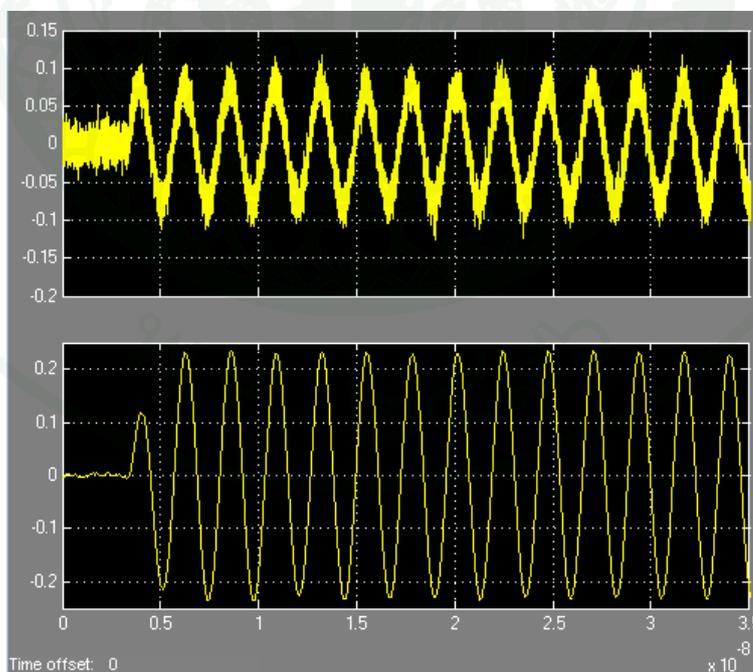
กลับคือมาได้ และตัวสัญญาณมีการเลื่อนไป 3.34ns ซึ่งตรงกับที่ควรจะเป็นสำหรับระยะ 1 เมตร

1.4 ทดลองหาผลของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 433 MHz



ภาพที่ 54 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 433MHz Band-Pass Filter)

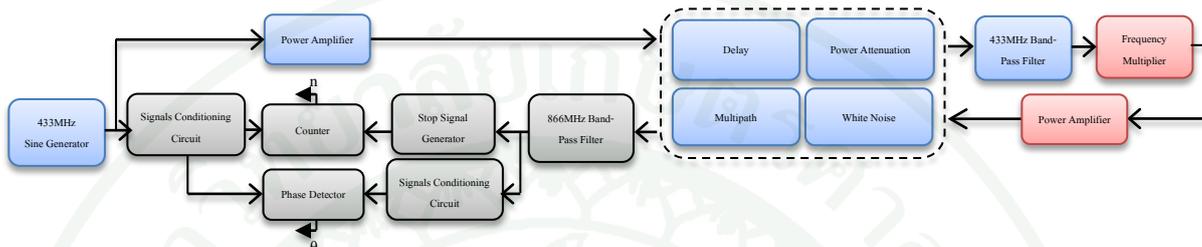
เมื่อสัญญาณส่งออกไปถึงอุปกรณ์เป้าหมายแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรกรองความถี่ ซึ่งได้ผลของสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้วดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 สัญญาณก่อนเข้าวงจรก่อน(กราฟบน) และสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแล้ว(กราฟล่าง)

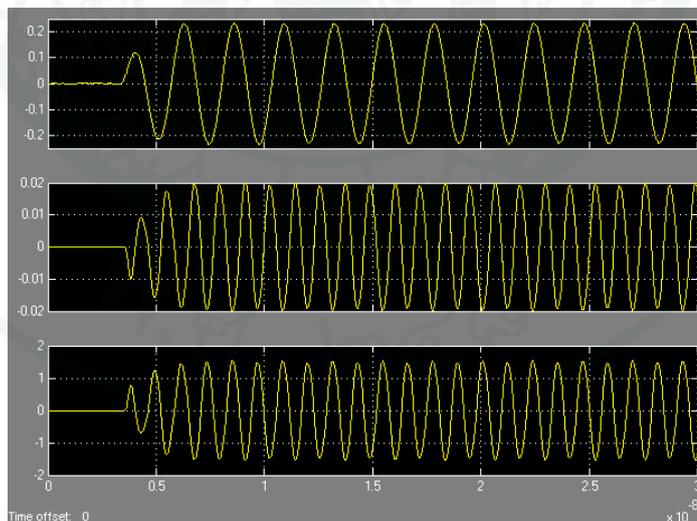
จากผลที่ได้ตามภาพที่ 55 กราฟล่าง จะเห็นได้ว่า วงจรกรองสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ดี แต่มีข้อผิดพลาดในส่วนของคลื่นสัญญาณลูกแรก เนื่องจากตัววงจรต้องการการอัดประจุเข้าตัวเก็บประจุก่อน แล้ววงจรจึงจะสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

1.5 ทดลองหาผลของวงจรคูณความถี่ 2 เท่า และวงจรขยายกำลังสัญญาณ



ภาพที่ 56 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Frequency Multiplier และ Power Amplifier)

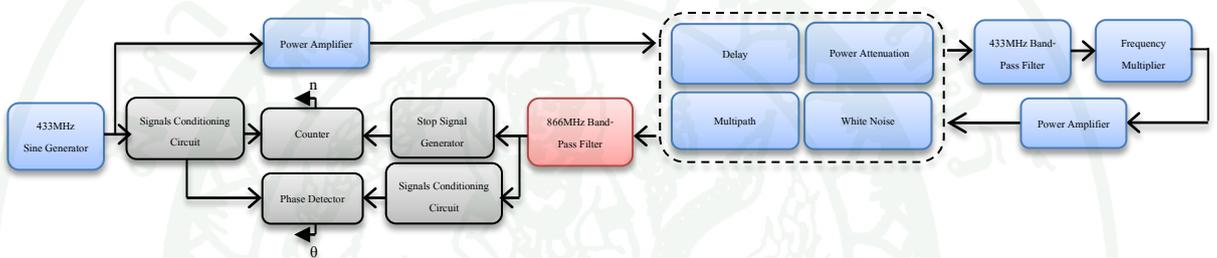
จากสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองเมื่อนำมาเข้าวงจรคูณความถี่และวงจรขยายกำลังแล้ว จะได้ผลการทดลองตามภาพที่ 57



ภาพที่ 57 สัญญาณก่อนเข้าวงจรคูณความถี่(กราฟบน) สัญญาณเมื่อผ่านวงจรคูณความถี่แล้ว (กราฟกลาง) และสัญญาณเมื่อผ่านวงจรขยายกำลัง(กราฟล่าง)

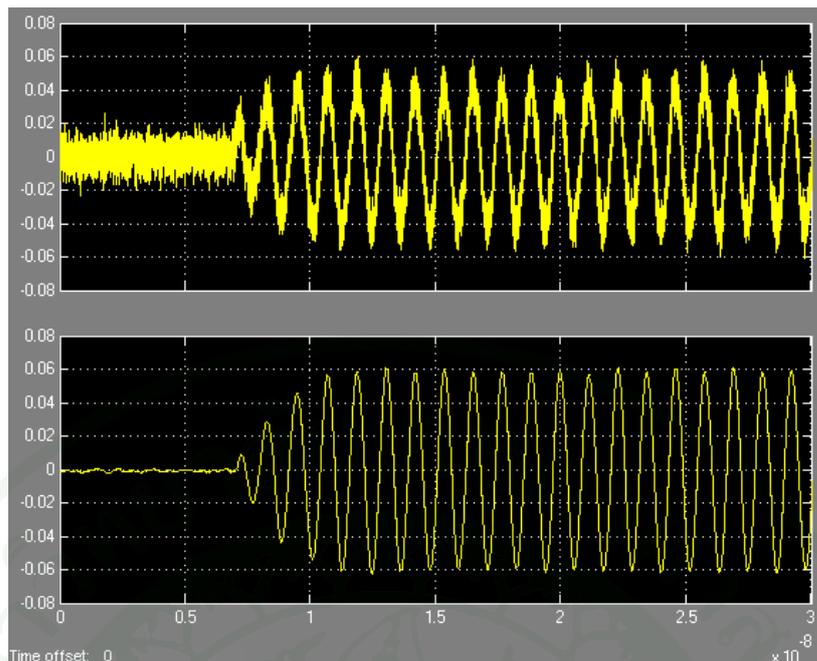
จากผลการทดลองในภาพที่ 57 กราฟบนแสดงให้เห็นถึงสัญญาณก่อนเข้าวงจร  
 คุณความถี่ ภาพที่ 57 กราฟกลางแสดงให้ถึงสัญญาณที่ผ่านวงจรคุณความถี่แล้ว ซึ่งได้คาบของ  
 สัญญาณอยู่ที่ 1.1271ns หรือความถี่อยู่ที่ 887.23MHz ซึ่งถือว่าอยู่ช่วงที่ยอมรับได้ และจากภาพ  
 ที่ 57 กราฟล่างแสดงให้เห็นถึงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายกำลัง ซึ่งสามารถขยายสัญญาณ  
 โดยได้ค่า amplitude อยู่ที่ 1.48V หรือกำลังงานของสัญญาณอยู่ที่ 0.9094dB ซึ่งใกล้เคียงกับ  
 ความต้องการคือ 0dB และจากนั้นอุปกรณ์เป้าหมายจะนำสัญญาณที่ได้ ทำการส่งเป็นสัญญาณ  
 ตอบกลับไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ต่อไป

1.6 ทดลองหาผลของวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz



ภาพที่ 58 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)

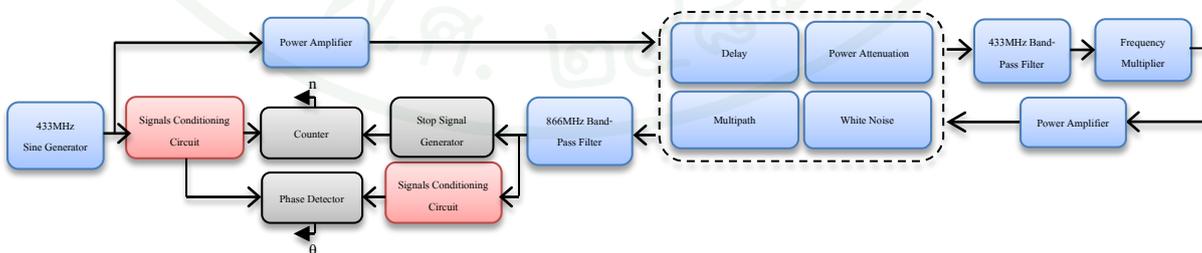
จากสัญญาณตอบกลับที่ได้ ขั้นตอนถัดมาคือการกรองสัญญาณรบกวนออกด้วย  
 วงจรกรองความถี่ที่ความถี่กลาง 866MHz โดยมีผลการทดลองของวงจรตามภาพที่ 59



ภาพที่ 59 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่กลาง ที่ความถี่กลางเท่ากับ 866 MHz

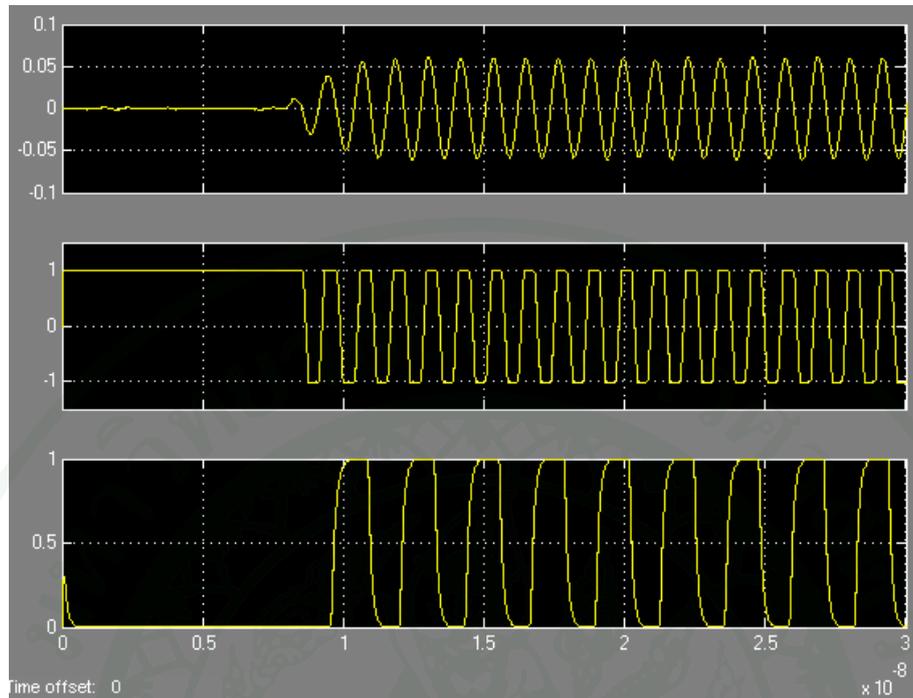
จากภาพที่ 59 กราฟล่างจะพบว่า สัญญาณรบกวนได้หายไปมากและเห็นสัญญาณที่ต้องการได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับสัญญาณก่อนกรองในกราฟบน แต่คลื่นลูกแรกของสัญญาณนั้นมีขนาดที่เล็กมากเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นปัญหาได้ง่ายในการใช้งานที่ระยะทางที่มากขึ้น เนื่องจากว่าคลื่นลูกแรกนั้นมีความสำคัญมากเพราะใช้ในการหยุดวงจรนับ

1.7 ทดลองหาผลของวงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่น ไซน์ เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม และวงจรหารความถี่



ภาพที่ 60 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน 866MHz Band-Pass Filter)

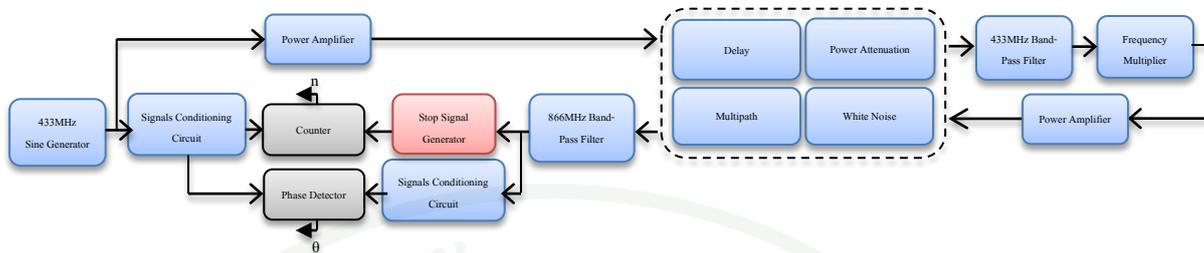
จากการทดลองจะได้ผลการทดลองดังภาพที่ 61



ภาพที่ 61 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรรอกความถี่(กราฟบน) วงจรแปลงสัญญาณ(กราฟกลาง) และวงจรหารความถี่(กราฟล่าง)

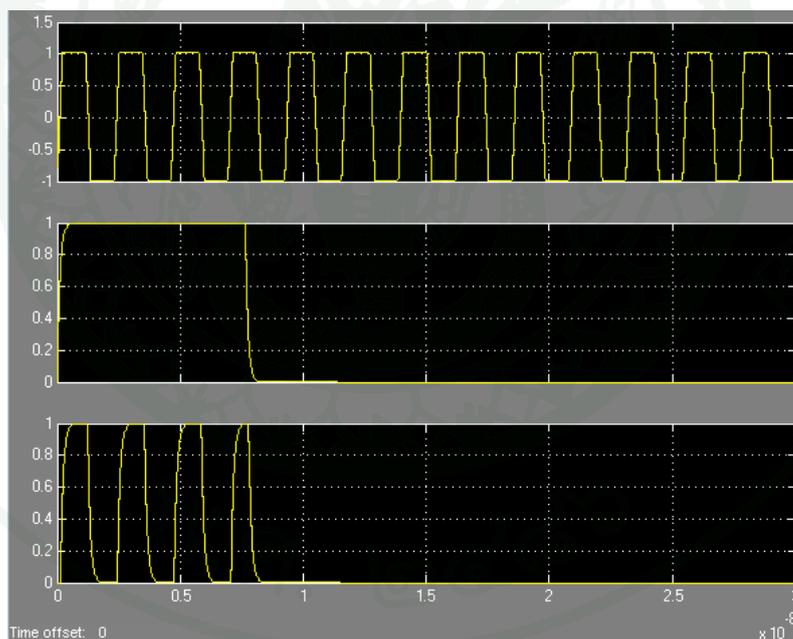
จากผลการทดลองที่ได้นั้นสามารถหาคาบของสัญญาณเอาต์พุตได้เท่ากับ  $2.31\text{ns}$  หรือมีความถี่เท่ากับ  $433.08\text{MHz}$  ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณที่ได้ทำการส่งออกไป ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นไซน์ที่ได้ส่งออกไปตั้งแต่ต้น เพื่อทำการหาความคลาดเคลื่อนเฟส และจำนวนรอบของสัญญาณที่ส่งออกไปเพื่อหาระยะทางต่อไป

1.8 ทดลองหาผลของวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ



ภาพที่ 62 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Stop Signal Generator)

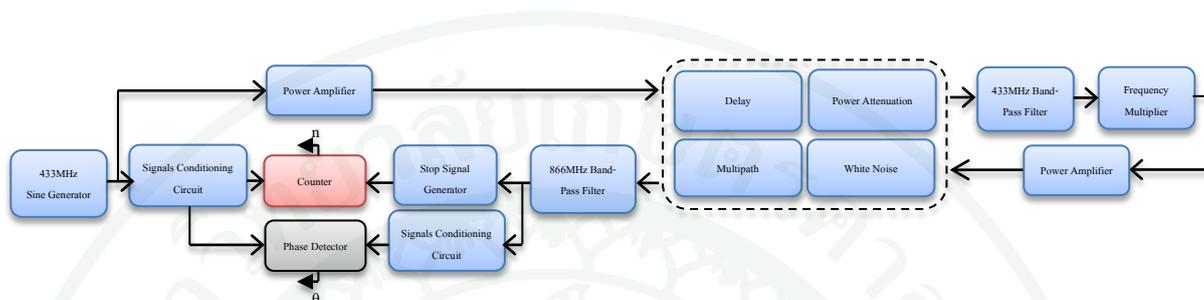
เมื่อได้สัญญาณตอบกลับที่อยู่ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็นำไปเข้าวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงในภาพที่ 63



ภาพที่ 63 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ(กราฟกลาง) สัญญาณที่นำไปจับวงจรมับ(กราฟล่าง) และสัญญาณส่งออกซึ่งในรูปแบบของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม(กราฟบน)

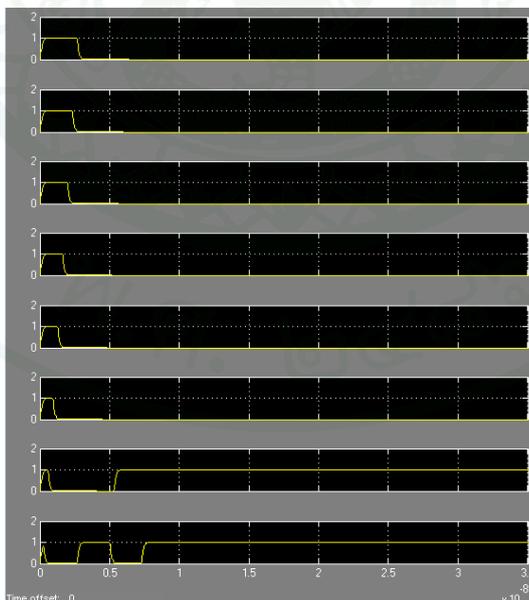
จากผลที่ได้จะเห็นว่า สัญญาณที่จะนำไปจับวงจรมันจะสิ้นสุดเมื่อวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับได้ให้เอาที่พุทออกมาเป็น logic low ซึ่งจากกราฟล่างแสดงให้เห็นว่าตัววงจรมีการตอบสนองที่ไวและแม่นยำ

1.9 ทดลองหาผลของวงจรมับ ขนาด 8 บิต



ภาพที่ 64 แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (เลือกทดลองเฉพาะส่วน Counter)

และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญในการหาระยะทางในครั้งนี้ก็คือวงจรมับจำนวนรอบของสัญญาณส่งออกก่อนที่จะได้รับสัญญาณตอบกลับจากอุปกรณ์เป้าหมายซึ่งผลที่ได้เป็นดังภาพที่ 65



ภาพที่ 65 ผลการทดลองของวงจรมับ

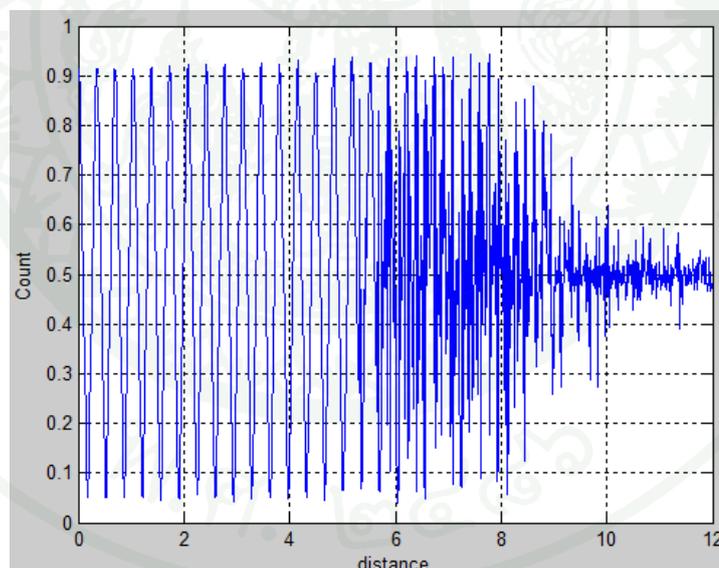


จากผลการทดลองภาพที่ 67 กราฟบนแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบไฟตรงที่ได้จากการเปรียบเทียบของสัญญาณ และกราฟล่างแสดงให้เห็นถึงช่วงของค่าคลาดเคลื่อนเฟสนั้นอยู่ช่วงใด ซึ่งให้ผลที่ชัดเจนเนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบไฟตรงที่ได้มีความเรียบและไม่มีการคลื่นและมี rise time อยู่ประมาณ 50ns ซึ่ง

## 2. การทดลองหาระยะห่างระหว่างตัวอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่กับอุปกรณ์เป้าหมาย

จากผลการทดลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ได้มาทั้งหมด ทำให้เราทราบว่าแนวคิดในการสร้างแบบจำลองและวงจรต่าง ๆ นั้นสามารถทำงานได้จริง ดังนั้นขั้นตอนต่อไปคือการนำเอาแบบจำลองทั้งหมดมาใช้งานจริง โดยเริ่มทดลองหาระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตั้งแต่ระยะ 0 เมตร จนถึงระยะ 12 เมตร ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

2.1 ผลของเอาท์พุทที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนขององค์ประกอบไฟตรง ( $V_{phase}$ ) เปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

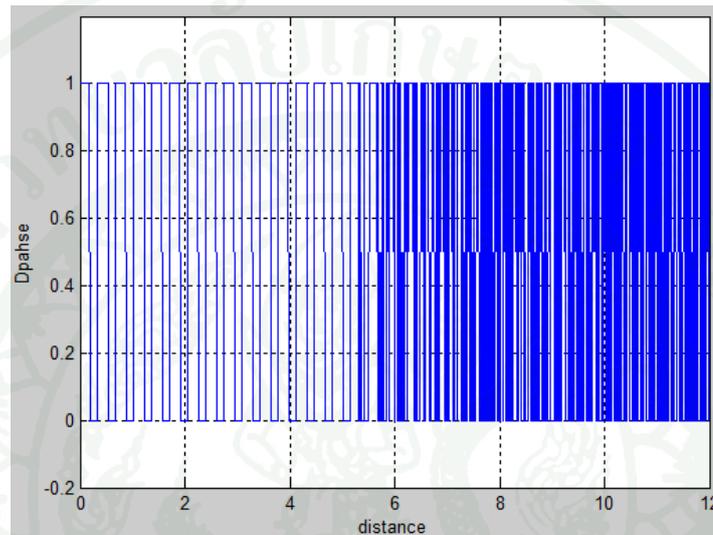


ภาพที่ 68 กราฟแสดงผลของเอาท์พุทที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนขององค์ประกอบไฟตรงเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง

จากภาพที่ 68 แสดงให้เห็นว่าค่าเอาท์พุทที่ได้จากวงจรมันสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนเฟสนั้นแปรผันตามระยะทางจริง แต่จากผลที่ได้มันจะเห็นว่า ค่า

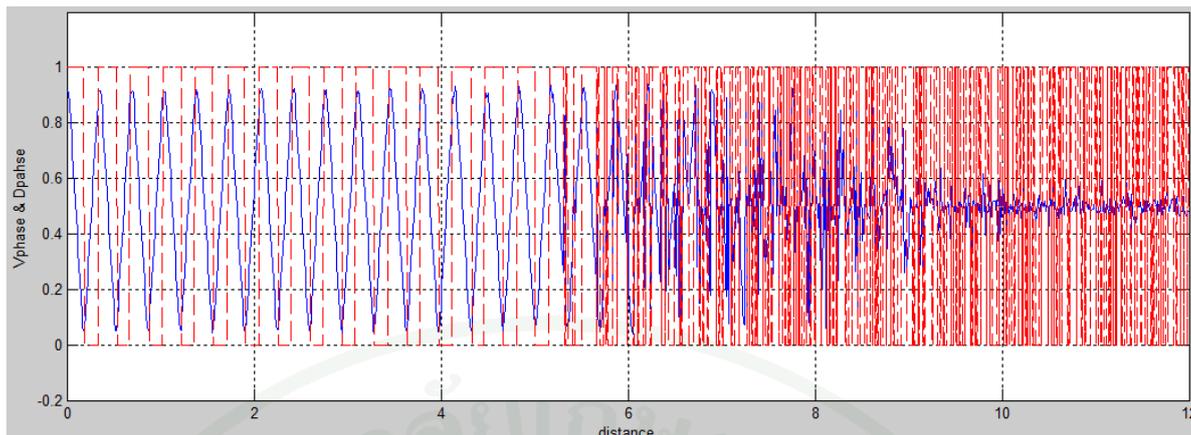
ความคลาดเคลื่อนเฟสนั้นไม่สามารถมีค่าสูงถึง 1V และต่ำลงถึง 0V ได้จริงตามที่ออกแบบไว้ และค่าที่ได้เริ่มมีค่าที่ผิดพลาดตั้งแต่ระยะห่างเท่ากับ 5.29 เมตร เป็นต้นไป

2.2 ผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนของ สัญญาณบอกช่วงของความคลาดเคลื่อนเฟส ( $D_{phase}$ ) เปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง



ภาพที่ 69 กราฟแสดงผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฟสในส่วนของสัญญาณบอกช่วงความคลาดเคลื่อนเฟสเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้ในภาพที่ 69 จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถบอกช่วงของความคลาดเฟสได้ชัดเจนและเมื่อนำผลของ  $V_{phase}$  และ  $D_{phase}$  มารวมกันจะได้ตามภาพที่ 70



ภาพที่ 70 กราฟแสดงผลของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฟสเทียบระยะทางที่ทำการทดลอง

แต่เมื่อพิจารณาผลที่ได้รวมกันจะเห็นได้ว่า ผลของสัญญาณบอกช่วงของความคลาดเคลื่อนเฟสยังคงมีความผิดพลาดอยู่ เนื่องจากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนช่วงนั้น ไม่ได้อยู่ตรงบริเวณยอดหรือบริเวณส่วนล่างสุดพอดี ซึ่งจะทำให้เกิด error ขึ้นได้

และจากการที่ค่า  $V_{phase}$  ไม่สามารถขึ้นถึง 1V และลงถึง 0V ได้ตามที่ออกแบบเอาไว้ นั่นทำให้เราต้องแก้ไขสมการ การหาค่าความคลาดเคลื่อนเฟสใหม่เป็นดังนี้

$$\theta = \frac{\pi(V_{phase} - V_{min})}{V_{max} - V_{min}}(1 - D_{phase}) + \left( \frac{\pi(V_{max} - V_{phase})}{V_{max} - V_{min}} + \pi \right) (D_{phase})$$

โดยที่

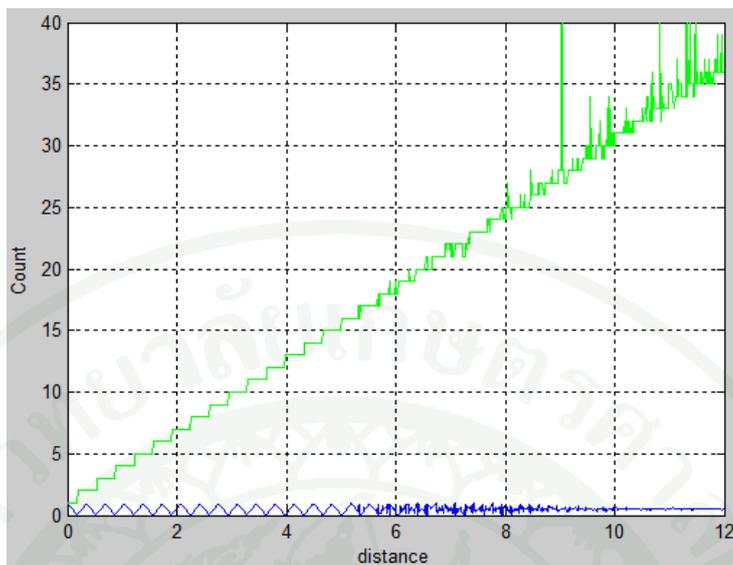
$V_{max}$  คือ ค่าสูงสุดของ  $V_{phase}$  ที่ได้จากการทดลอง

$V_{min}$  คือ ค่าต่ำสุดของ  $V_{phase}$  ที่ได้จากการทดลอง

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้สามารถหาค่า  $V_{max}$  และ  $V_{min}$  ได้มีค่าเท่ากับ 0.9435 และ 0.0388 ตามลำดับ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการจะได้ค่าดังนี้

$$\theta = \frac{\pi(V_{phase} - 0.0388)}{0.9047}(1 - D_{phase}) + \left( \frac{\pi(0.9435 - V_{phase})}{0.9047} + \pi \right) (D_{phase})$$

### 2.3 ผลของวงจรมับ (Count) เปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง



ภาพที่ 71 กราฟแสดงผลของวงจรมับเปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

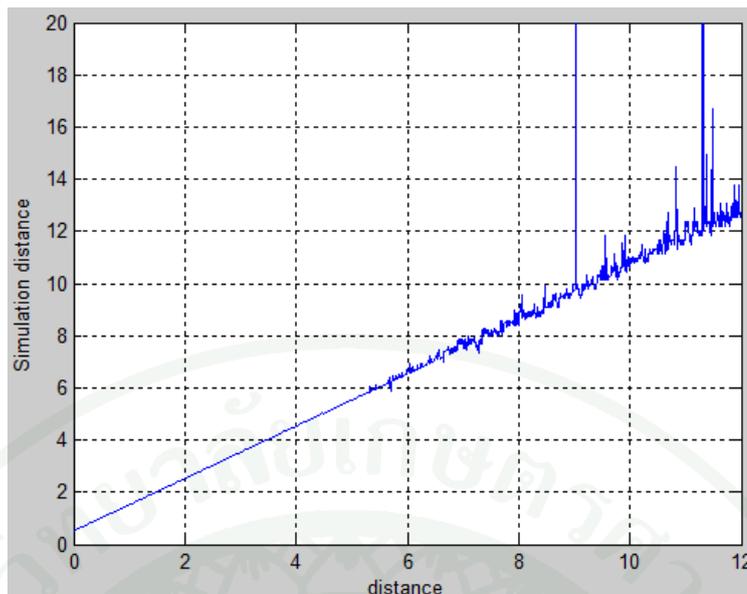
จากผลการทดลองในภาพที่ 71 จะเห็นได้ว่า วงจรมับนั้นได้ทำการนับรอบของสัญญาณ ได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับคาบของค่า  $V_{phase}$  ในกราฟสีน้ำเงิน

### 2.4 ผลของระยะทางที่คำนวณได้จากค่า $V_{phase}$ , $D_{phase}$ และ Count เปรียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

เมื่อได้องค์ประกอบทางสัญญาณทั้งหมดตามที่เราร้องการแล้ว ขั้นตอนถัดมาก็คือการหาระยะทางจากผลการทดลองที่ได้ ซึ่งค่าระยะทางสามารถหาได้ดังนี้

$$d = \left( n + \frac{\theta}{2\pi} \right) \frac{\lambda_c}{2}$$

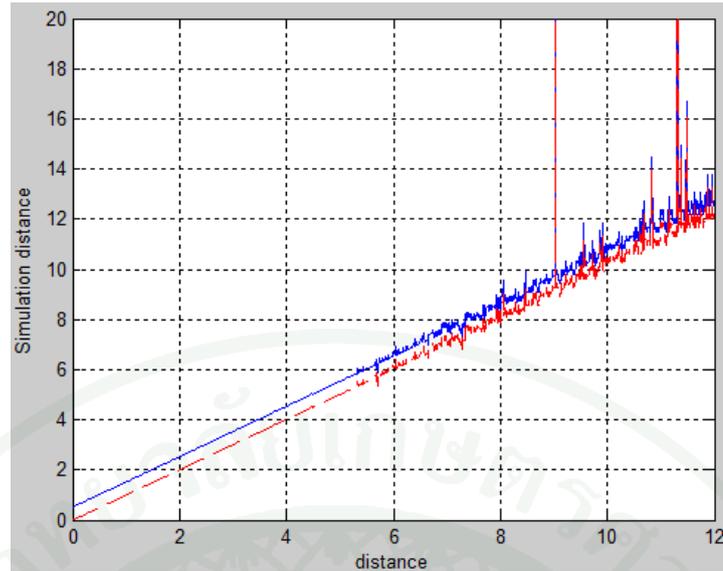
และเมื่อกำหนดตามสมการแล้วจะได้ค่าของระยะทางตามภาพที่ 72



ภาพที่ 72 กราฟแสดงระยะทางที่ได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

ซึ่งจากผลที่ได้นั้นทำให้เราเห็นว่าแบบจำลองที่เราได้สร้างขึ้นนั้นยังคงมีค่า offset ตามที่ได้คาดการณ์ไว้ จึงต้องทำการนำผลที่ได้จากการทดลองที่ระยะทางจริงเท่ากับ 0 เมตร ลบออกจากสมการ และจะได้ผลการทดลองสุดท้ายตามภาพที่ 73 ในกราฟสีแดง ซึ่งค่า offset ที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 0.4453 เมตร มีผลทำให้สมการในการหาค่าระยะทางเปลี่ยนเป็น

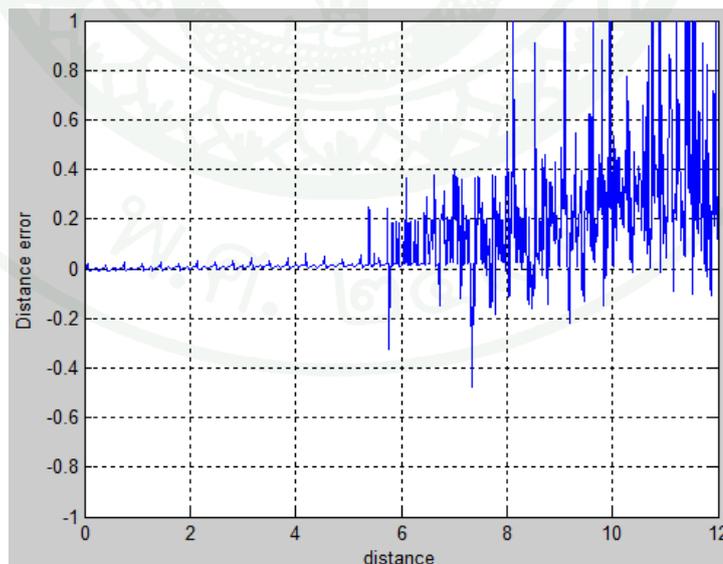
$$d = \left(n + \frac{\theta}{2\pi}\right) \frac{\lambda_c}{2} - 0.4453$$



ภาพที่ 73 กราฟแสดงระยะทางที่ได้จากผลการทดลองเมื่อทำการลบค่า offset ออกแล้ว (กราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

#### 2.5 หาค่า error ที่ได้จากการทดลอง

ในการหาค่า error นั้นสามารถทำได้โดย นำค่าระยะทางที่ได้จากผลการทดลอง ลบกับค่าระยะทางจริง ซึ่งค่า error ที่ได้นั้นเป็นไปตามภาพที่ 74

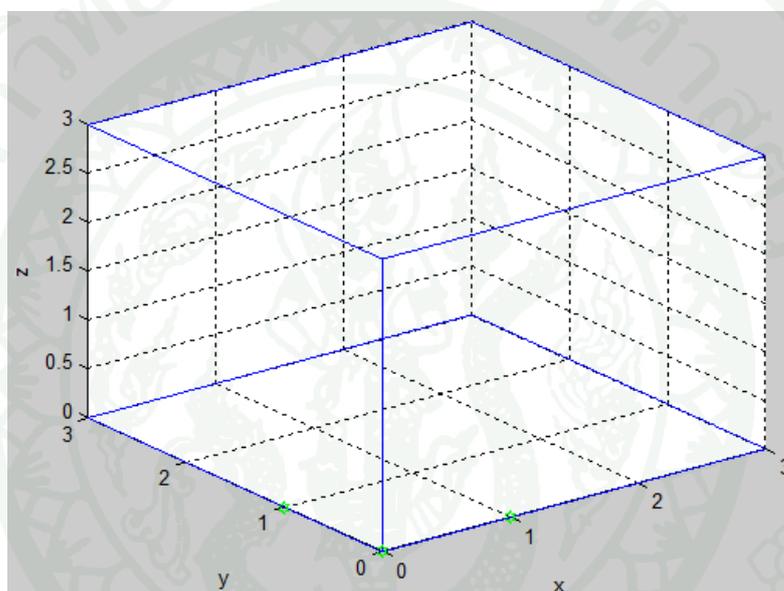


ภาพที่ 74 กราฟแสดงค่า error ที่ได้ เปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ทำการทดลอง

เมื่อทำการหาค่า error ที่อยู่ในช่วง 0 เมตร ถึง 5.29 เมตร จะเห็นได้ว่าค่า error มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.0585 เมตร หรือเท่ากับ 5.58 เซนติเมตรนั่นเอง แต่แบบจำลองนี้จะเริ่มทำงานผิดพลาดมากขึ้นตั้งแต่ระยะทาง 5.29 เมตรเป็นต้นไป

### 3. ผลการทดลองการหาพิกัดด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น

ในการหาพิกัดหรือการ localization นั้น เราจะทำการกำหนดรูปแบบของตำแหน่งอุปกรณ์เป้าหมายในปริภูมิ 3 มิติ โดยมีพิกัดตำแหน่งการวางอุปกรณ์เป้าหมายดังภาพที่ 75



ภาพที่ 75 ตำแหน่งการวางของอุปกรณ์เป้าหมายที่ใช้ในการทดลองหาพิกัด และตำแหน่งการวางของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ทั้ง 3 ตัว

ในการทดลองครั้งนี้ ได้กำหนดให้ใช้อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ทั้งหมด 3 ตัว โดยวางไว้อยู่ที่ตำแหน่ง  $S_1(1,0,0)$ ,  $S_2(0,1,0)$  และ  $S_3(0,0,0)$  และอุปกรณ์เป้าหมาย  $T(x, y, z)$  1 ตัว วางตามตำแหน่งต่างๆในเส้นที่ได้กำหนดไว้ โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

หาค่าระยะห่างจริงจากการอุปกรณ์เป้าหมาย  $T(x, y, z)$  ไปยังอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  ซึ่งมีค่าเป็น  $d_1, d_2$  และ  $d_3$  ตามลำดับ โดยที่

$$d_1 = \sqrt{(T_x - 1)^2 + T_y^2 + T_z^2}$$

$$d_2 = \sqrt{(T_y - 1)^2 + T_x^2 + T_z^2}$$

และ

$$d_3 = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}$$

นำค่าระยะห่างที่ได้ทั้ง 3 ไปยังแบบจำลองของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่แต่ละตัว โดยที่อุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่จะทำการผลัดกันส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์เป้าหมาย หรือเรียกว่าวิธีการส่งข้อมูลแบบนี้ว่า Time Division Multiple Access (TDMA) ซึ่งอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่  $S_1$  จะเริ่มทำการส่งสัญญาณเพื่อหาระยะทางก่อน และจากนั้นอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่  $S_2$  และ  $S_3$  ก็จะทำการหาระยะทางกับอุปกรณ์เป้าหมายต่อไปตามลำดับ

นำค่าระยะทางที่ได้มาทำการคำนวณหาพิสัยโดยใช้สมการด้านล่าง

$$Ts_x = \frac{ds_3^2 - ds_1^2 + 1}{2}$$

$$Ts_y = \frac{ds_3^2 - ds_2^2 + 1}{2}$$

และ

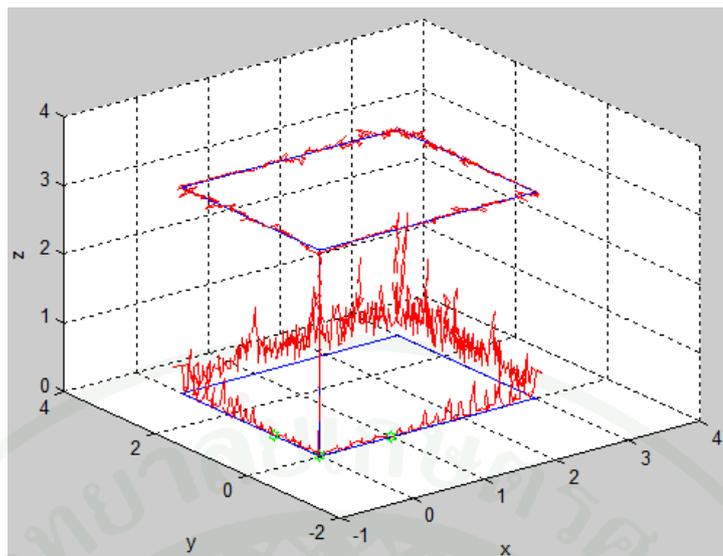
$$Ts_z = \sqrt{ds_3^2 - Ts_x^2 - Ts_y^2}$$

โดยที่

$ds_n$  คือ ระยะห่างที่ได้จากการทดลอง (เมตร)

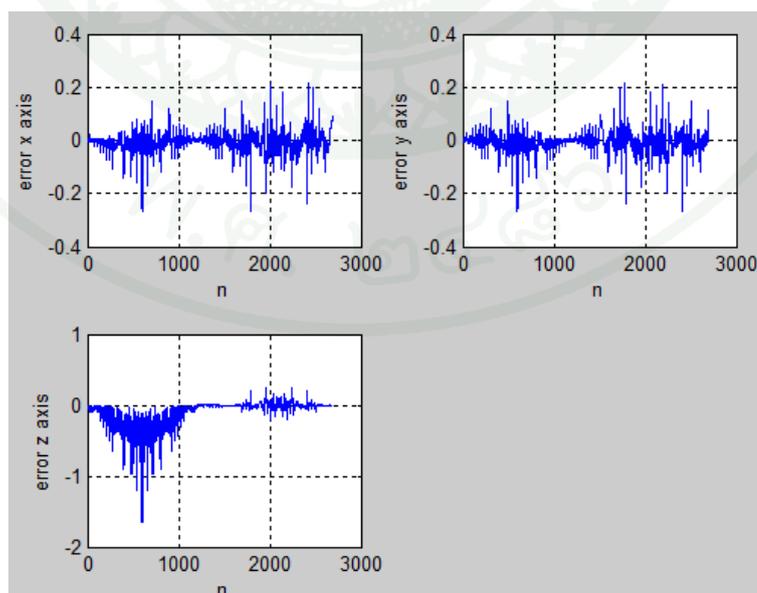
$Ts_n$  คือ พิกัดของอุปกรณ์เป้าหมาย ที่ได้จากการทดลอง (เมตร)

ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้จากการทดลองกับตำแหน่งจริง พร้อมหาค่าของ error ในแต่ละส่วนซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ซึ่งได้ผลการทดลองตามภาพที่ 76 และภาพที่ 77



ภาพที่ 76 ผลการทดลองหาค่าตำแหน่งของอุปกรณ์เป้าหมาย(กราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่ใช้ในการทดลอง พร้อมตำแหน่งของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่

จากผลการทดลองที่ได้ในภาพที่ 76 ในกราฟสีแดงได้แสดงให้เห็นว่า ค่าพิกัดที่ได้จากการทดลองนั้นมี error ในแกน z ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแกน x และแกน y เนื่องจากการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ติดตั้งอยู่กับที่ของ  $S_3$  นั้นวางอยู่ที่พิกัด  $(0,0,0)$  ซึ่งมีผลทำให้การหาตำแหน่งในแนวแกน z ต้องหาจากค่าพิกัดแกน x และแกน y ด้วย ส่งผลให้ค่าที่ได้ของแกน z นั้นมี error สะสมค่อนข้างมากทำให้ได้ค่าตามที่ปรากฏในภาพที่ 76



ภาพที่ 77 ค่าตำแหน่งผิดพลาดที่ได้ในการทดลองแยกตามแนวแกนต่างๆ

จากภาพที่ 77 จะสรุปได้ว่าค่า error สูงสุดที่ของแกน x อยู่ที่ 0.2661 เมตร ค่า error สูงสุดที่ของแกน y อยู่ที่ 0.2661 เมตร และ ค่า error สูงสุดที่ของแกน z อยู่ที่ 1.6456 เมตร ซึ่งเกิดจากเหตุที่ได้กล่าวก่อนข้างต้นทำให้ค่า error ในแกน z นั้นมีค่าอยู่ในระดับที่สูง

## วิจารณ์

จากผลการทำงานของวงจรต่างๆภายในแบบจำลองสามารถวิจารณ์การทำงานได้ดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 433 MHz สามารถให้สัญญาณเอาต์พุตที่ถูกต้อง โดยมีขนาดของยอดคลื่นอยู่ที่ 1V และความถี่อยู่ที่ 433.09MHz ตามที่ต้องการ
- วงจรขยายกำลังสัญญาณก่อนส่งออก สามารถให้สัญญาณเอาต์พุตที่กำลังงานส่งออกอยู่ที่ -0.0172dB และไม่ทำให้สัญญาณผิดเพี้ยน
- การส่งสัญญาณส่งออกผ่านช่องสัญญาณจะทำให้สัญญาณที่ปรากฏบนอุปกรณ์อีกฝั่งมีสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่างๆปรากฏอยู่ด้วย รวมถึงสัญญาณยังเกิดการหน่วงและเกิดการลดลงของกำลังงานตามที่ต้องการ
- วงจรกรองความถี่กลาง สามารถกรองสัญญาณรบกวนออกได้ตามที่ต้องการ แต่สัญญาณเอาต์พุตในคลื่นลูกแรกจะเกิดความเพี้ยนเกิดขึ้น (ค่ายอดคลื่นลดลง) เนื่องจากตัวเก็บประจุภายในวงจรต้องการการอัดประจุก่อน วงจรจึงจะสามารถทำงานได้ตามปกติ
- วงจรคูณความถี่ 2 เท่า สามารถคูณความถี่ของสัญญาณได้ตามที่ต้องการโดยมีความถี่ของเอาต์พุตอยู่ที่ 887.23MHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการคือ 866MHz
- วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นไซน์เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม สามารถแปลงสัญญาณได้ถูกต้อง แต่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกหน่วงเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Hysteresis ของวงจร แต่สามารถแก้ไขได้ในขั้นตอนการปรับเทียบ
- วงจรสร้างสัญญาณหยุดนับและวงจรมับขนาด 8 บิตสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการโดยมีความเร็วใจการตอบสนองดีกว่าที่ได้คาดการณ์ไว้
- วงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสสามารถทำงานได้ดี แต่ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสัญญาณ ทำให้ต้องมีการแก้ไขสมการที่ใช้ในการคำนวณ และสัญญาณบอกช่วงของเฟสที่ได้นั้น ไม่ตรงกับค่าคลาดเคลื่อนเฟสที่ควรจะเป็น เนื่องจากวงจรทั้งสองนั้นอิสระต่อกัน

และจากผลการทดลองในการระยะทางระหว่างตัวอุปกรณ์และการหาตำแหน่งที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถทำได้ตามทฤษฎีข้างต้น โดยให้ค่าของระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ที่แม่นยำโดยมีระยะผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 5.85 เซนติเมตร แต่เนื่องจากตัวทฤษฎีที่ใช้ต้องการ Bit Error Rate (BER) เท่ากับ 0 เลยมีผลทำให้ระยะแม่นยำที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง 0 เมตร ถึง 5.29 เมตร เท่านั้น และการบอกตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถทำได้แม่นยำในพิกัดของแกน x และ y เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ติดตั้งอยู่ที่วางอยู่บนตำแหน่งแกน z จึงทำให้ตำแหน่งที่ได้มีค่าผิดพลาดมากสำหรับการบอกตำแหน่งในแกน z



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากทฤษฎีข้างต้นมีความแม่นยำที่สูงในระยาะ 0 เมตร ถึง 5.29 เมตร โดยมีระยะผิดพลาดอยู่เพียง 5.85 เซนติเมตร โดยใช้แค่เพียงอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้าในการสร้างวงจร และไม่ต้องการสัญญาณนาฬิกาภายนอกช่วยในการทำงาน ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน และมีการตอบสนองของอุปกรณ์ที่ไว้มาก โดยใช้เวลาเพียง 0.3 $\mu$ s ในการหาระยะทาง

### ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ได้ของวงจรบางส่วนนั้นยังไม่เป็นที่พอใจเท่าที่ควร โดยที่วงจรที่ควรปรับปรุงเพิ่มคือ วงจรกรองความถี่กลาง วงจรนับ และวงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟส โดยที่วงจรกรองความถี่นั้นให้สัญญาณเอาต์พุตที่เพี้ยนไปสำหรับคลื่นลูกแรก ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณที่สำคัญมาก เพราะต้องนำไปใช้สำหรับวงจรสร้างสัญญาณหยุดนับ ถ้าหากสัญญาณที่ได้ขาดคลื่นลูกแรกไปก็จะทำให้ระยะที่วัดได้นั้นเกิดระยะผิดพลาดถึง 0.3462 เมตร

ในส่วนของวงจรถับ และวงจรตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเฟสนั้น วงจรทั้งสองที่ใช้ยังอิสระต่อกันอยู่ ซึ่งโดยปกติอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทุกตัวจะมีความเร็วที่ไม่เท่ากัน ทำให้ค่าที่ได้จากทั้งสองวงจรมันไม่สัมพันธ์กัน มีผลทำให้เกิดระยะคลาดเคลื่อนขึ้น ดังนั้นควรหาวิธีทำให้วงจรทั้งสองเกิดความสัมพันธ์กันเช่นการ feedback สัญญาณเป็นต้น หรือเปลี่ยนวิธีสร้างวงจรทั้งสองนี้โดยรวมเข้าด้วยกัน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Bischoff, U., M. Strohbach, M. Hazas, and G. Kortuem. 2006. Constraint-Based Distance Estimation in Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. pp. 54-68. *In EWSN 2006*, Zurich, Switzerland.
- Blumenthal, J., F. Reichenbach and D. Timmermann. 2005. Position Estimation in Ad hoc Wireless Sensor Networks with Low Complexity. pp. 41-50. *In Proceedings of the 2nd workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'05) & 1st Ultra-Wideband Expert Talk (UET'05)*, Dresden, Germany.
- Chan, Y., W. Tsui, H. So and P. Ching. 2006. Time-of-Arrival Based Localization Under NLOS Conditions. pp. 17-24. *In IEEE Transactions on Vehicular Technology*, New York, USA.
- Grossmann, R., J. Blumenthal, F. Golasowski, and D. Timmermann 2007. Localization in Zigbee-based Sensor Networks. *In 1st European ZigBee Developer's Conference (EuZDC)*, Munich, Germany.
- Kugelstadt, T. 2009. **Active Filter Design Techniques**. Available Source: <http://www.ti.com/lit/ml/sloa088/sloa088.pdf>, July 30, 2009.

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายหนึ่ง จรรย์รุ่งโรจน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 กรกฎาคม พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ Engineering สร้างสรรค์	รางวัล Industrial Award for Outstanding Project, รางวัลชนะเลิศและรางวัลความคิด ยอดเยี่ยม ในการแข่งขัน YECC ปี 2009 โดย ICT
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนการศึกษา NTC โดย TRIDI